

УДК 622.276.7:622.245

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА  
ВЯЖУЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ГЛУБИНУ ЕЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ  
В РАЗУПЛОТНЕННЫЙ КОЛЛЕКТОР  
ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА**

**Р. А. Гасумов<sup>1</sup>, Е. Ю. Кукулинская<sup>1</sup>, Ю. К. Димитриади<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО «Северо-Кавказский научно-исследовательский проектный институт  
природных газов», г. Ставрополь, Россия

<sup>2</sup>Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия

**Аннотация.** Одним из факторов, определяющих эффективность укрепления слабосцементированного коллектора химическим способом, является глубина проникновения вяжущей жидкости в пласт. Эта величина зависит от характеристик продуктивного коллектора, компонентного состава и реологических свойств вяжущей жидкости, а также от технологических параметров ее закачки в разуплотненную зону. В работе приведены результаты расчета взаимосвязи перечисленных факторов на величину радиуса проникновения жидкости, установлены оптимальные реологические свойства и параметры закачки вяжущей жидкости.

*Ключевые слова:* призабойная зона пласта; вяжущая жидкость; реологические характеристики; глубина проникновения; репрессия на пласт

**EVALUATING THE INFLUENCE OF COMPONENT COMPOSITION  
OF BINDING FLUID ON THE DEPTH OF ITS PENETRATION  
INTO THE UNCONSOLIDATED RESERVOIR  
OF THE PRODUCTIVE FORMATION**

**R. A. Gasumov<sup>1</sup>, E. Yu. Kukulinskaya<sup>1</sup>, Yu. K. Dimitriadi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>JSC «SevKavNPIgaz», Stavropol, Russia

<sup>2</sup>North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

**Abstract.** The depth of penetration of the binding fluid into the formation is one of the factors to determine the effectiveness of semiconsolidated reservoir stabilization by a chemical method. This value depends on the properties of the productive formation, the component composition and rheological characteristics of the binding fluid, as well as the technological parameters of its injection into the unconsolidated reservoir. The article presents the results of the interrelation of the above factors on the value of fluid penetration radius, the optimum rheological characteristics and the parameters of the binding fluid injection are established.

*Key words:* bottomhole formation zone; binding fluid; rheological characteristics; the depth of penetration; overbalance

Укрепление разуплотненной призабойной зоны пласта (ПЗП) химическим способом является одним из видов ремонтно-восстановительных работ, направленных на сохранение производительности скважин газовых и газоконденсатных месторождений. Химический способ укрепления коллектора предполагает закачку в разуплотненную зону пласта закрепляющих технологических жидкостей и позво-

ляет путем реакции между компонентами раствора скрепить песчаные зерна пласта в единый прочный конгломерат и исключить вынос песка в скважину [1–3]. Эффективность данного способа укрепления неконсолидированного пласта зависит от множества взаимосвязанных факторов, в том числе характеристик продуктивного коллектора, компонентного состава и реологических свойств вязущей жидкости, технологических параметров ее доставки в разуплотненный пласт. Критерием, объединяющим вышеперечисленные факторы и определяющим качество укрепления разуплотненного продуктивного пласта путем создания прочного проницаемого песчаного барьера, снижающего влияние депрессии при последующей эксплуатации скважины, является глубина (радиус) проникновения вязущей жидкости в неконсолидированную зону коллектора.

С целью установления глубины проникновения вязущей жидкости в разуплотненный пласт применяют следующую формулу [4]:

$$R_{\phi} = R_c \sqrt{1 + \frac{1,728 \cdot \Delta P \cdot T \cdot K}{m \cdot \eta \cdot R_c}} \quad (1)$$

где  $\Delta P$  — репрессия на пласт, МПа;  $T$  — время контакта состава с пластом, сут;  $K$  — проницаемость пласта, мкм<sup>2</sup>;  $m$  — открытая пористость, доли;  $\eta$  — вязкость жидкости, мПа·с.

В соответствии с формулой (1) характеристики продуктивного коллектора ( $K$ ,  $m$ ) являются неуправляемыми факторами и зависят от конкретных горно-геологических условий газового месторождения, а параметры вязущей жидкости (непосредственно  $\eta$  и косвенно  $\Delta P$ ) являются управляемыми, и поэтому их можно регулировать на начальном этапе.

Величина параметра  $\Delta P$  обуславливается реологическими характеристиками и значением плотности самого вязущего раствора. Прохождение вязущей жидкости через пористую среду разуплотненного коллектора происходит за счет разности забойного и пластового давлений

$$\Delta P_{\text{репрес.}} = P_{\text{забойн.}} - P_{\text{пласт.}} \quad (2)$$

где  $P_{\text{забойн.}}$  — величина забойного давления, МПа;  $P_{\text{пласт.}}$  — величина пластового давления, МПа.

Необходимо отметить, что важным моментом при создании репрессии на пласт и прокачке вязущей жидкости в разуплотненный коллектор с целью создания укрепленного интервала является недопущение гидравлического разрыва пород, которое устанавливается согласно условию

$$P_{\text{пласт.}} + \Delta P_{\text{репрес.}} < P_{\text{забойн.}} < P_{\text{грн}} \quad (3)$$

Исходя из неравенства (3), можно записать условие, ограничивающее величину создаваемой репрессии при закачке вязущей жидкости в разуплотненный коллектор,

$$\Delta P_{\text{репрес.}} < P_{\text{грн}} - P_{\text{пласт.}} \quad (4)$$

Для расчета давления гидроразрыва пласта  $P_{\text{грн}}$  применяют известную формулу Б. А. Итона

$$P_{\text{грн}} = P_{\text{пласт.}} + \left( \frac{\nu}{1 - \nu} \right) \cdot (P_{\text{геост.}} - P_{\text{пласт.}}) \quad (5)$$

где  $P_{\text{грн}}$  — давление гидроразрыва пласта, МПа;  $P_{\text{пласт.}}$  и  $P_{\text{геост.}}$  — пластовое и геостатическое давление, МПа;  $\nu$  — коэффициент Пуассона (для песчанистого пласта  $\nu = 0,38-0,45$ ).

Тогда неравенство (4) можно записать следующим образом:

$$\Delta P_{репрес.} < \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right) \cdot (P_{геост.} - P_{пласт.}). \quad (6)$$

В соответствии с неравенством (6) можно рассчитать допустимое значение величины репрессии вязущей жидкости на пласт, при котором можно создать оптимальный радиус укрепленного интервала коллектора.

С целью определения влияния регулируемого фактора — реологических характеристик вязущей жидкости на глубину ее проникновения в разуплотненный коллектор — были приготовлены растворы № 1–6 на основе реагента «Монасил Н-28» [5] путем постепенного добавления при постоянном перемешивании навески последнего в предварительно подогретую до 60 °С воду до полного растворения. Затем в растворы № 2–5 при непрерывном помешивании вводили белковый реагент (БР) в количестве 0,3; 0,5; 1 и 1,5 масс. % от массы сухого реагента «Монасил Н-28» соответственно. На основе комбинированного реагента, представляющего собой сухую смесь реагента «Монасил Н-28» и компонента органической природы — водорастворимого полимера реагента гипан (ВПРГ), содержание которого в составе вязущего раствора составляет 6 масс. % — приготовлен раствор № 6.

Основные реологические характеристики вязущих растворов № 1–6 приведены в таблице 1.

Таблица 1

*Реологические показатели вязущих растворов*

Номер состава раствора	Компонентный состав вязущего раствора на основе реагента «Монасил Н-28»	$\eta$ , мПа·с	$\eta_{эф.}$ , мПа·с	$\tau_0$ , дПа	СНС <sub>1/10</sub> , дПа	n
1	Без добавки	6	6,5	4,788	4,78/4,78	0,89
2	+ 0,3 масс. % БР	6	6,5	4,788	4,78/4,78	0,89
3	+ 0,5 масс. % БР	7,5	7,75	2,394	7,18/7,18	0,95
4	+ 1 масс. % БР	8	8	4,728	7,18/7,18	0,99
5	+ 1,5 масс. % БР	8	7,8	4,788	7,18/7,18	0,99
6	+ 6 масс. % ВПРГ	16	16,5	5,516	7,18/7,18	0,99

*Примечание. Исследования выполнены при стандартных условиях.*

Для создания прочного и надежно укрепленного интервала вязущему раствору необходимо проникнуть на минимально достаточную глубину, то есть радиус проникновения должен составлять не менее 0,5–0,65 м.

Таблица 2

*Влияние величины репрессии на глубину проникновения вязущей жидкости в пласт*

Номер состава раствора	Пластическая вязкость, мПа·с	Глубина проникновения, м			
		при репрессии $\Delta P = 0,5$ МПа	при репрессии $\Delta P = 1,0$ МПа	при репрессии $\Delta P = 2,0$ МПа	при репрессии $\Delta P = 5,0$ МПа
1	6	0,39	0,55	0,77	1,2
2	6	0,39	0,55	0,77	1,2
3	7,5	0,35	0,49	0,69	1,11
4	8	0,34	0,48	0,66	1,0
5	8	0,34	0,48	0,66	1,0
6	16	0,25	0,34	0,47	0,74

*Примечание. K, m, R<sub>c</sub>, T = const, где K = 2,5 мкм<sup>2</sup>; m = 0,3 доли; R<sub>c</sub> = 0,11 м; T = 1 сут.*

Согласно формуле (1) в таблицах 2–4 и на соответствующих рисунках 1–3 представлены результаты расчета глубины проникновения вязущей жидкости рецептур № 1–6 в слабосцементированный коллектор при различных значениях репрессии на пласт ( $\Delta P$ ) — от 0,5 до 5,0 МПа, проницаемости ( $K$ ) — от 0,5 до 2,0 мкм<sup>2</sup> и пористости пласта ( $m$ ) — от 0,1 до 0,9 долей.

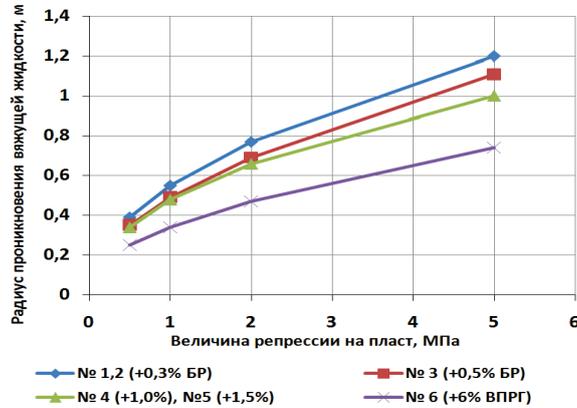


Рис. 1. Зависимость радиуса проникновения вязущей жидкости от величины репрессии на пласт

Таблица 3

Влияние величины проницаемости продуктивного разуплотненного пласта на глубину проникновения вязущей жидкости в пласт

Номер состава раствора	Пластическая вязкость, мПа·с	Глубина проникновения, м			
		при проницаемости $K = 0,5$ мкм <sup>2</sup>	при проницаемости $K = 1,0$ мкм <sup>2</sup>	при проницаемости $K = 1,5$ мкм <sup>2</sup>	при проницаемости $K = 2,0$ мкм <sup>2</sup>
1	6	0,36	0,47	0,57	0,66
2	6	0,36	0,47	0,57	0,66
3	7,5	0,33	0,49	0,47	0,60
4	8	0,30	0,38	0,45	0,57
5	8	0,30	0,38	0,45	0,57
6	16	0,22	0,30	0,33	0,41

Примечание.  $\Delta P$ ,  $m$ ,  $R_c$ ,  $T = \text{const}$ , где  $\Delta P = 2,0$  МПа;  $m = 0,3$  доли;  $R_c = 0,11$  м;  $T = 1$  сут.

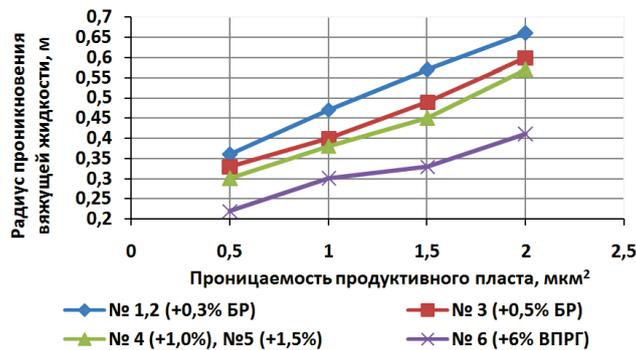
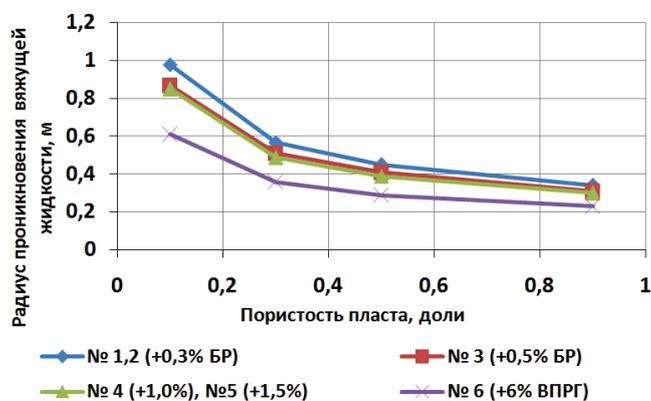


Рис. 2. Зависимость радиуса проникновения вязущей жидкости от величины репрессии на пласт

**Влияние величины пористости продуктивного разуплотненного пласта на глубину проникновения вязущей жидкости в пласт**

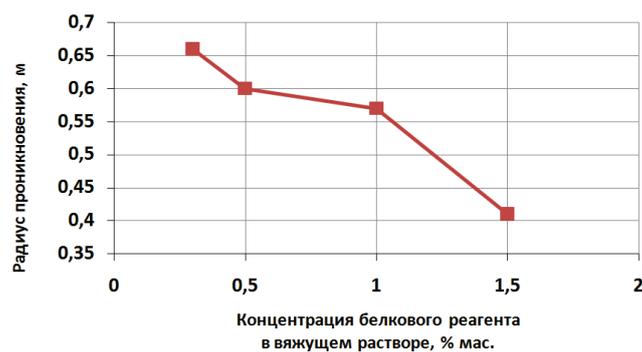
Номер состава раствора	Пластическая вязкость, мПа·с	Глубина проникновения, м			
		при пористости $m = 0,1$ доли	при пористости $m = 0,3$ доли	при пористости $m = 0,5$ доли	при пористости $m = 0,9$ доли
1	6	0,98	0,57	0,45	0,34
2	6	0,98	0,57	0,45	0,34
3	7,5	0,87	0,51	0,41	0,31
4	8	0,85	0,49	0,39	0,30
5	8	0,85	0,49	0,39	0,30
6	16	0,61	0,36	0,29	0,23

Примечание.  $\Delta P, K, R_c, T = const$ , где  $\Delta P = 2,0$  МПа;  $K = 1,5$  мкм<sup>2</sup>;  $R_c = 0,11$  м;  $T = 1$  сут.



*Рис. 3. Зависимость радиуса проникновения вязущей жидкости от величины пористости пласта*

На рисунке 4 проиллюстрирована зависимость радиуса проникновения вязущей жидкости от концентрации БР.



*Рис. 4. Зависимость радиуса проникновения вязущей жидкости от концентрации белкового реагента*

Опираясь на представленные результаты расчета и соответствующие графики, можно констатировать закономерную зависимость — чем ниже показатель пластической вязкости вязущей жидкости, тем больше глубина проникновения вязущей жидкости в разуплотненный пласт. С повышением величины репрессии и проницаемости продуктивного пласта радиус проникновения жидкости увеличивается, при этом повышение пористости пласта приводит к снижению проникающей способности.

Введение полимерных реагентов БР и ВПРГ в состав вязущего раствора с целью увеличения прочностных показателей скрепляемого керна приводит к увеличению вязкости вязущих растворов № 2–5. Это, в свою очередь, отражается на радиусе проникновения жидкости в сторону его уменьшения. На рисунках 1–3 проиллюстрировано, что кривые вязущих жидкостей с БР за счет невысокой вязкости лежат выше, чем кривая вязущей с ВПРГ, поэтому в составе вязущего раствора предпочтительней использовать полимер белкового происхождения БР. Например, при одинаковых параметрах  $\Delta P = 2$  МПа и  $K = 1,5$  мкм<sup>2</sup> глубина проникновения вязущей жидкости при введении БР с концентрацией 1 масс. % равна 0,5 м, а при добавлении ВПРГ — всего 0,36 м.

Таким образом, на основе проведенных исследований установлено, что регулирование управляемых факторов — компонентного состава и непосредственно реологических характеристик вязущей жидкости — влияет на глубину проникновения жидкости в разуплотненный пласт и опосредованно воздействует на качество укрепления разуплотненного коллектора. Введение модифицирующей добавки БР в состав вязущей жидкости в отличие от ВПРГ не приводит к повышению вязкости вязущей жидкости, обеспечивая технологически достаточную глубину ее проникновения в неконсолидированный пласт.

#### *Библиографический список*

1. Разработка композиции для крепления призабойной зоны пласта в скважинах подземных хранилищ газа / Л. А. Магадова [и др.] // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2012. – № 5. – С. 63–67.
2. Гасумов Р. А., Кукулинская Е. Ю. Технологические решения, направленные на ограничение выноса пластового песка из добывающих газовых скважин // Наука. Инновации. Технологии. – 2016. – № 3. – С. 165–176.
3. Укрепление слабосцементированных пород продуктивного пласта / Р. А. Гасумов [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – № 11. – С. 32–35.
4. Бабаян Э. В. Буровые технологии. – 2-е изд., доп. – Краснодар: Совет. Кубань, 2009. – 896 с.
5. Григорьев П. Н., Матвеев М. А. Растворимое стекло. – М.: Промстройиздат, 1956. – 443 с.

#### *Сведения об авторах*

**Гасумов Рамиз Алиевич**, д. т. н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, первый заместитель генерального директора АО «СевКавНИПИгаз», г. Ставрополь, тел. 88652563026, e-mail: Priemnaya@scnipigaz.ru

**Кукулинская Екатерина Юрьевна**, младший научный сотрудник научного отдела восстановления и повышения производительности скважин, АО «СевКавНИПИгаз», г. Ставрополь, тел. 865235969, e-mail: kukulinskayaEY@scnipigaz.ru

**Димитриади Юлианна Константиновна**, к. т. н., доцент, и. о. заведующего кафедрой строительства нефтяных и газовых скважин, Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, тел. 8652330432, e-mail: ms.sngs@mail.ru

#### *Information about the authors*

**Gasumov R. A.**, Doctor of Engineering, Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, First Deputy General Director of JSC «SevKavNIPigaz», Stavropol, phone: 88652563026, e-mail: Priemnaya@scnipigaz.ru

**Kukulinskaya E. Yu.**, Junior Researcher of the Scientific Department of Recovery and Well Productivity Improvement, JSC «SevKavNIPigaz», Stavropol, phone: 865235969, e-mail: kukulinskayaEY@scnipigaz.ru

**Dimitriadi Yu. K.**, Candidate of Engineering, Associate Professor, Acting Head of Department of Oil and Gas Well Construction, North-Caucasus Federal University, Stavropol, phone: 8652330432, e-mail: ms.sngs@mail.ru