

*Роботу присвячено удосконаленню технології покращення фільтраційних властивостей привибійних зон нафтових та газових свердловин, яку засновано на їх комплексній водневій та термогазохімічній обробці. Водень, який виділяється на початковій стадії термохімічного процесу, покращує проникність колектора. Для поглибленого вивчення та удосконалення цих процесів у роботі проведено математичне моделювання діяння суміші газів ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ) на газову проникність карбонатного керна*

*Ключеві слова: нафтова свердловина, водень, активація, проникність, колектор, аномальні властивості, привибійна зона*

*Работа посвящена совершенствованию технологии улучшения фильтрационных свойств призабойных зон нефтяных и газовых скважин, основанной на их комплексной водородной и термогазохимической обработке. Выделяющийся на начальной стадии термохимического процесса водород улучшает проницаемость колектора. Для углубленного изучения и усовершенствования этих процессов в работе проведено математическое моделирование воздействия смеси газов ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ) на газовую проницаемость карбонатного керна*

*Ключевые слова: нефтяная скважина, водород, активация, проницаемость, колектор, аномальные свойства, призабойная зона*

УДК 661.96:622.276.6

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29316

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОДУКТИВНЫЕ ПЛАСТЫ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

**О. В. Кравченко**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

E-mail: krav@ipmach.kharkov.ua

**Д. А. Велигоцкий**

Ведущий инженер\*

E-mail: mr.vda59@mail.ru

**А. Н. Авраменко**

Кандидат технических наук, научный сотрудник\*

E-mail: an0100@yandex.ru

**Р. А. Хабибуллин**

Генеральный директор

Industrial Technologies Group Ltd

E-mail: rkhab@yandex.ru

\*Институт проблем машиностроения

им. А. Н.Подгорного НАН Украины

ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

## 1. Введение

Производительность нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин определяется качественным состоянием призабойной зоны пласта (ПЗП), которое характеризуется главным образом его проницаемостью, то есть способностью фильтровать к забою скважины добываемые углеводороды. Практически все пласты, представленные такими породами как пески, песчаники, карбонаты, доломиты, глины, обладая достаточно высокой пористостью, имеют невысокую естественную проницаемость, при которой через породу возможна фильтрация, как правило, только газа, и то, при большом пластовом давлении. Естественная проницаемость ПЗП, как правило, ухудшается еще на стадии первичного вскрытия (во время бурения и обсаживания) за счет механической кольматации призабойной зоны скважины буровыми и цементировочными растворами. В период всего срока эксплуатации скважины происходит кольматация ПЗП продуктами разрушения пласта и асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО), что приводит к снижению про-

ницаемости горной породы ПЗП и, соответственно, уменьшению дебита скважины.

Все вышеперечисленные факторы влияют на качество фильтрационных свойств ПЗП, нарушают гидродинамическую связь продуктивного пласта со скважиной, в результате чего снижается ее продуктивность.

Решение проблемы увеличения добычи и роста коэффициента извлечения углеводородов видится в создании и внедрении технологий, в ходе реализации которых осуществляется интегрированное многофакторное физико-химическое воздействие на призабойную зону пласта, направленное на устранение в течение одной обработки всех основных причин кольматации, а также улучшения фильтрационной способности колектора. Этим требованиям на сегодняшний день отвечает технология комплексного водородного и термобарохимического воздействия (КВТБХВ) на призабойную зону продуктивного пласта [1]. Кроме прогрева порового пространства выделяемые в ходе процесса горячие газы выполняют и другие функции: водород увеличивает проницаемость колектора, а на высокотемпературной фазе обработки участвует в

гидрокрекинге тяжелых углеводородов [2],  $\text{CO}_2$  снижает вязкость нефти, принимает участие в преобразованиях карбонатов в гидрокарбонаты, газообразные оксиды азота – в ходе реакции с водой, в том числе пластовой, уже в ПЗП образуют азотную кислоту. В ходе термохимического процесса выделяются соляная кислота и поверхностно-активные вещества.

При подготовке к внедрению данной технологии выполняется математическое и физическое моделирование основных стадий термогазохимического процесса в ПЗП с учетом индивидуальных геолого-технических параметров конкретной скважины. Моделирование позволяет более точно определиться с термогазодинамическими и тепломассообменными характеристиками процесса в эксплуатационной колонне и в продуктивном пласте на всех стадиях его обработки. Особенно важным при моделировании является учет эффекта водородной активации диффузии.

---

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

---

В настоящее время существует много методов восстановления и повышения производительности, как отдельных скважин, так и всего месторождения [3].

Анализ современных технологий повышения нефтегазоотдачи, применяемых на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами показывает, что они основаны на различных видах физического и химического воздействия на пласт. Это тепловые, кислотные, щелочные обработки или их комбинации. Отдельно, как наиболее эффективный метод, позиционируется гидродинамический разрыв пласта. Однако и у последнего имеются свои ограничения в применении, особенно на нефтяных месторождениях с высоким содержанием парафина и высокой угрозой последующего увеличения обводненности пласта.

Одним из перспективных направлений интенсификации добычи нефти на таких месторождениях является сочетание термобарического и химического воздействий [4–6].

Эффективность химической или термохимической обработок плотных пород-коллекторов нефтяных и газовых скважин существенным образом зависит от величин проницаемости их призабойных зон. Связано это с тем, что активные химические компоненты рабочих составов при химической обработке (кислотной, щелочной, с применением поверхностно-активных веществ и др.) должны диффундировать в поровое пространство, контактировать и реагировать с колематантами непосредственно в продуктивном пласте.

Малая проницаемость ПЗП, особенно в уплотненных коллекторах, не позволяет проникать химически активным растворам в поровое пространство, делая при этом обработку неэффективной. Тепловое воздействие на ПЗП может улучшать ситуацию, так как с ростом температуры химическая активность кислот и щелочей увеличивается, а вязкость тяжелых углеводородов или АСПО снижается. В этом случае, в малопроницаемом коллекторе ожидаемые химические процессы могут иметь только локальный характер и не обладать необходимой протяженностью по радиусу ПЗП.

В таких случаях обычно прибегают к технологиям, которые при помощи механического воздействия жидкостью создают систему трещин в призабойной зоне и осуществляют связь с пластом (гидравлический разрыв пласта и его разновидности). Во многих случаях, геолого-технические и экологические ограничения, накладываемые на проведение гидроразрывов, тормозят внедрение данных технологий. Далеко не всегда их применение целесообразно и на месторождениях с высоким содержанием парафина и асфальтенов.

Эффект водородной активации процессов диффузии в нефтегазоносных пластах еще не достаточно хорошо изучен, поэтому современные математические модели его не учитывают.

Авторами предложен алгоритм уточнения математической модели с учетом данного эффекта, определяемого экспериментально. Для этого созданы моделирующие установки, на которых проводятся исследования по изменению проницаемости породы под воздействием различных газов (в том числе водорода), жидкостей и их смесей [4, 7].

Комплексное использование методов математического и физического моделирования позволяет более корректно исследовать процессы фильтрации газов в горную породу. Как правило, расчетная модель при этом уточняется экспериментальными данными исследований моделируемых процессов в керне реально-продуктивного горизонта, полученного в процессе бурения нефтяной или газовой скважины [8].

В расчетных исследованиях горная порода (керна) рассматривается как пористое тело (распределенное гидравлическое сопротивление, которое ограничено стенками расчетной области). При этом имеется возможность учета анизотропных свойств горной породы. В данном случае свойства горной породы задаются уже с учетом существующих экспериментальных данных.

При таком подходе делают несколько допущений, а именно: пористость и проницаемость горной породы – среднестатистическая. В теле керна не учитывается наличие трещин.

Более точным, но более дорогостоящим является подход, предложенный исследователями из Лондонского империалистического колледжа [9]. Применение магнитно-резонансного томографа с целью получения трехмерных снимков с геометрией пор реальной горной породы продуктивного пласта, позволяет учитывать особенности структуры изучаемой горной породы. Далее такой массив данных передается в программные комплексы для дальнейшего моделирования процесса проникновения газа в тело горной породы. Размер исследуемой области – куб с длиной грани 3 мм.

Несмотря на незначительные размеры расчетной области, в процессе описания сложной внутренней геометрии пор реальной горной породы возникает необходимость использовать расчетные сетки с размерностью несколько миллионов расчетных ячеек, что в свою очередь, требует сверхмощной вычислительной техники и значительного штата квалифицированных сотрудников. В дальнейшем результаты такого моделирования с использованием критериев подобия переносят на реальные объекты (продуктивный пласт нефтяной скважины) [9].

Анализ возможностей описанных выше современных компьютерных пакетов показал, что основные различия в результатах расчетных и экспериментальных исследований возникают из-за сделанных в численных моделях допущений в описании свойств пористых сред. Также практически не учитывается изменение этих свойств в ходе технологической обработки вследствие различных химических или физических воздействий.

Таким образом, одним из направлений совершенствования технологии комплексного водородного и термогазохимического воздействия на ПЗП является разработка методологии численного моделирования с учетом экспериментальных данных об изменении свойств породы в процессе обработки.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы являлось совершенствование методологии численного моделирования водородного термогазохимического воздействия на ПЗС с учетом данных экспериментальных исследований по влиянию водорода на проницаемость горной породы.

Основными задачами исследования являлось:

- формирование массива граничных условий (ГУ) для математического моделирования процесса воздействия газовой смеси на горную породу;
- подготовка массива данных на основе проведенных экспериментальных исследований с целью учета нелинейного закона изменения проницаемости горной породы при фильтрации через неё смеси газов с добавлением водорода;
- проведение математического моделирования процесса воздействия смеси газов с добавлением водорода на керны и оценка влияния на изменение их проницаемости в условиях пластовых давлений и температур;
- уточненный расчетный анализ течения газов в отдельно взятой поре горной породы и анализ результатов (Кнудсеновская диффузия [10]) для пор различной конфигурации;
- подготовка выводов и рекомендаций по углубленному изучению процессов водородного и термогазохимического воздействия на горную породу ПЗП с использованием численных методов.

### 4. Основные этапы и результаты расчетного исследования процесса воздействия смеси газов на горную породу

Основным объектом исследования являлись плотные карбонатные керны диаметром 50 мм, длиной 50 мм [7].

Расчетная модель разделена на три области: область, описывающую пристеночный слой керна (вход газов в тело керна), длиной 25 мм; область, описывающую тело керна, длиной 50 мм и область, описывающую пристеночный слой керна (выход газов из керна, длиной 25 мм). На границах между указанными областями задавались условия взаимодействия текучей среды с пористым телом (керном). Общий вид расчетной сетки и схема задания граничных условий (ГУ) представлены на рис. 1.

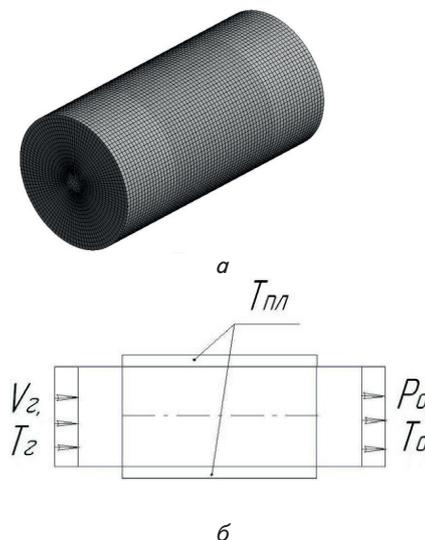


Рис. 1. Расчетная сетка и схема задания ГУ: а – сетка; б – схема

Расчетная сетка (рис. 1, а) содержит 115025 расчетных ячеек. Схема задания ГУ, представленная на рис. 1, б, содержит участок на входе в керн, на котором задавалась скорость и температура смеси газов, а также участок выхода из керна, на котором задавались параметры окружающей среды. При описании ГУ температура керна  $T_{пл}$  принималась 80 °С – средняя пластовая температура на глубинах залегания 2500–3000 метров.

Основные результаты проведенного ранее сравнительного экспериментального исследования по влиянию смеси газов с добавлением водорода на проницаемость карбонатного керна представлены в табл. 1. В качестве модельного газа использовалась смесь NO, NO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> в равных объемных пропорциях. К объему модельного газа добавляли водород (концентрации указаны в первой колонке табл. 1).

Таблица 1

Зависимость проницаемости кернов от перепада давления и концентрации водорода в модельном газе [7]

Перепад давления P, МПа	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Модельный газ	–	–	–	–	–
Модельный газ +5 % H <sub>2</sub>	–	–	–	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Модельный газ +10 % H <sub>2</sub>	–	–	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , NO	H <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub>
Модельный газ +20 % H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , NO	H <sub>2</sub> , NO	H <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>

В результате серии расчетов установлено, что современные программные комплексы с базовыми настройками не позволяют моделировать воздействие аномальных свойств водорода на проницаемость горной породы ПЗС, которые были выявлены ранее в сравнительном экспериментальном исследовании [7].

В работе использовались стандартные программные продукты для численного моделирования процессов течения жидкостей и газов в пористых телах. Уточнение математической модели процесса проникновения водорода в тело горной породы (керна) выполнено путем дополнения стандартной базы данных уникальными данными, полученными в ходе экспе-

риментальных исследований. В расчете учитывается увеличение газовой проницаемости горной породы за счет разупрочнения порового пространства и очистки пор от кольматанта.

Проведено дополнение компьютерной модели процесса проницаемости горной породы за счет формирования и добавления в программный комплекс массива данных, описывающих нелинейный закон изменения проницаемости горной породы ПЗС при воздействии водорода. В частности, при расчетах проницаемости карбонатных уплотненных пород учитывались экспериментальные данные по увеличению проницаемости по длине зерна. Результаты компьютерного моделирования приведены на рисунках 2 и 3. Распределение массовой доли водорода в меридиональном сечении зерна при фильтрации смеси газов с 20 % содержанием водорода приведены на рис. 2. Процесс воздействия моделировался в течении 1000 с в с интервале давлений 1,5 до 2,5 МПа (табл. 1). На рис. 2, а представлено распределение массовой доли водорода при давлении 1,5 МПа. На рис. 2, б представлено распределение массовой доли водорода при давлении 2 МПа. На рис. 2, в представлено распределение массовой доли водорода при давлении 2,5 МПа.

Из результатов численных исследований, представленных на рис. 2 видно, что смесь газов с содержанием водорода 20 % не проникает сквозь зерно даже при давлении газе 2,5 МПа, тогда как, результаты проведенного ранее экспериментального исследования показывают фильтрацию водорода на рассматриваемом режиме уже при 1,5 МПа (табл. 1).

Это несоответствие подтверждает то, что в математической модели, описывающей процесс воздействия смеси газов на зерно, необходимо учитывать аномальные диффузионные свойства водорода.

На графике (рис. 3) показана зависимость относительного количества каждого из компонентов модельного газа, продиффундировавших через зерно, от перепада давления и объемной концентрации водорода.

Для этого, с учетом полученных экспериментальных данных [7], был проведен расчет увеличения проницаемости горной породы при воздействии водорода. В расчете учитывалось увеличение проницаемости ( $K$ ) зерна при воздействии водорода на горную породу с 0,023 до 0,055 мкм<sup>2</sup>. Результаты расчета приведены на рис. 4.

На рис. 4 представлено расчетное распределение давления газов по длине зерна (рис. 4, а) и массовой доли водорода в меридиональном сечении зерна (рис. 4, б). Данные расчета с применением уточненной компьютерной модели согласуются с экспериментальными данными. Так, при перепаде давлений в 1,5 МПа на выходе из зерна наблюдается присутствие водорода, что сопоставимо с экспериментом (табл. 1).

Распределение давления газов в меридиональном сечении зерна представлено на рис. 4, а. Давление изменяется равномерно по длине зерна от 0,15 МПа до давления окружающей среды.

Далее, с учетом полученных данных о параметрах течения смеси газов (давлении, скорости и температуре газов) в теле зерна, проводились численные исследования течения флюида в отдельно взятых порах различной геометрии. Такие расчеты позволили получить представление о динамике течения газов в поровом пространстве и описать механизм процесса диффузии водорода в поровое пространство горной породы ПЗП при водородной активации нефтяной и газовой скважины.

Для математического моделирования диаметр поры был принят равным 100 нм, а длина 1000 нм. Расчетная сетка, описывающая конфигурацию одной идеализированной поры, в виде цилиндра, представлена на рис. 5.

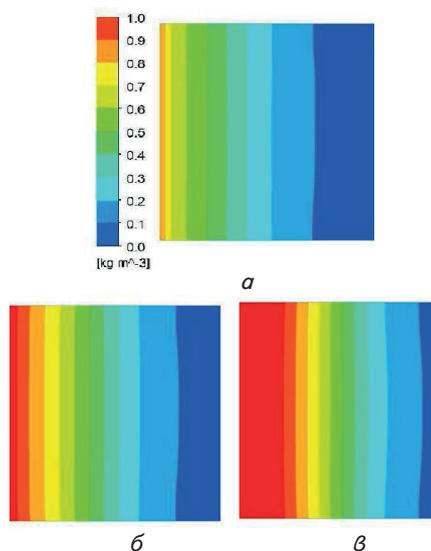


Рис. 2. Распределение массовой доли водорода в меридиональном сечении зерна: а – P=1.5 МПа, б – P=2,0 МПа, в – P=2,5 МПа

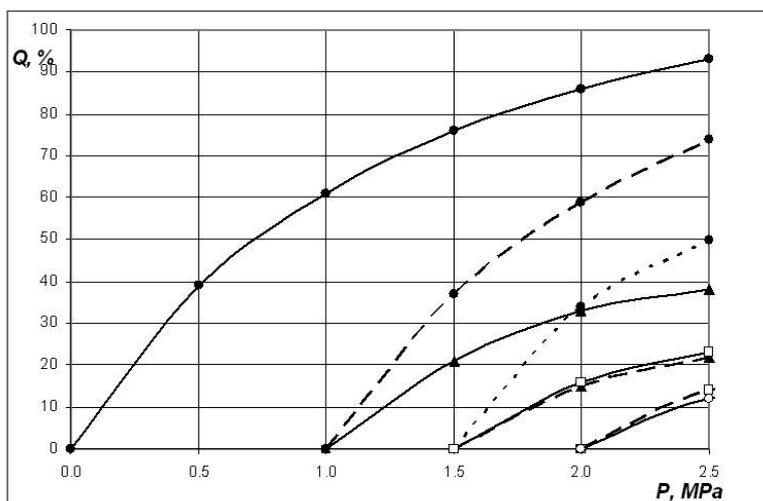


Рис. 3. Относительное количество составляющих модельного газа, проходящих через зерно в зависимости от перепада давления и концентрации водорода модельном газе: ● – H<sub>2</sub>; ▲ – NO; □ – NO<sub>2</sub>; ○ – CO<sub>2</sub>; — – модельный газ + 20 % H<sub>2</sub>; ---- – модельный газ + 10 % H<sub>2</sub>; ..... – модельный газ + 5 % H<sub>2</sub>

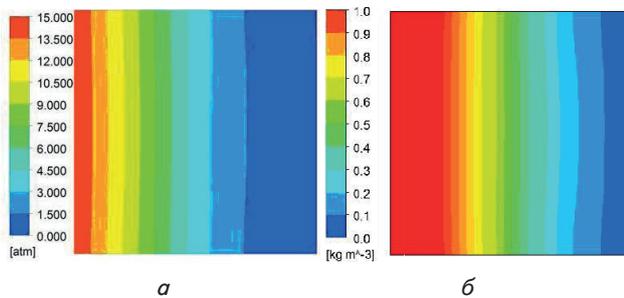


Рис. 4. Распределение параметров течения смеси газов в меридиональном сечении ядра ( $P = 1,5$  МПа):  
 а — давления газов в теле ядра;  
 б — массовой доли водорода

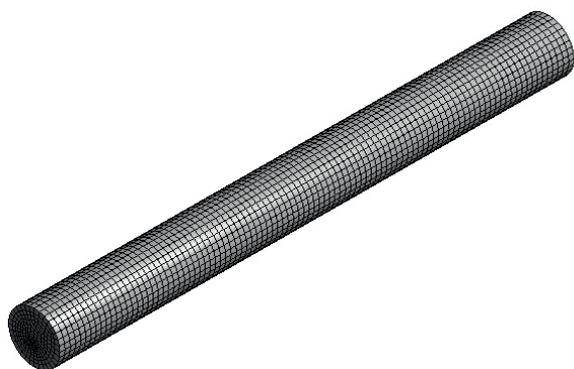


Рис. 5. Расчетная сетка, описывающая конфигурацию одной поры (20230 расчетных ячеек)

Методика расчетного исследования была идентична представленной выше, используемой для оценки проникновения смеси газов с добавлением водорода в тело карбонатного ядра. Результаты расчетного исследования представлены на рис. 6.

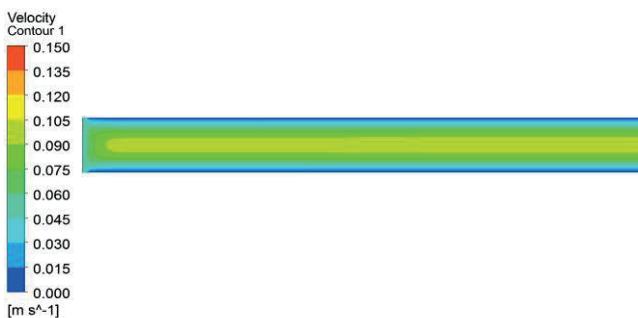


Рис. 6. Распределение скорости течения молекулярного водорода в меридиональном сечении поры

Скорость течения молекулярного водорода в поре изменяется неравномерно. Максимальная скорость достигает 0,12 м/с в центральной части, а вблизи стенок скорость потока снижается с 0,03 до 0 м/с.

Проведено математическое моделирование течения газовой смеси в идеализированной поре с сужением. Данная модель («конфузор – узкий канал – диффузор») может применяться для описания кольматации порового пространства (выпадение на стенках пор парафина или АСПО). Обобщенные результаты проведенного исследования представлены на рис. 7, 8.

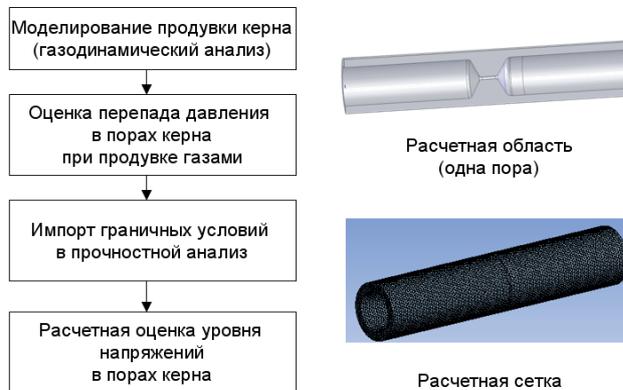


Рис. 7. Алгоритм решения сопряженной задачи, пример расчетной области и расчетной сетки, используемой в структурном анализе

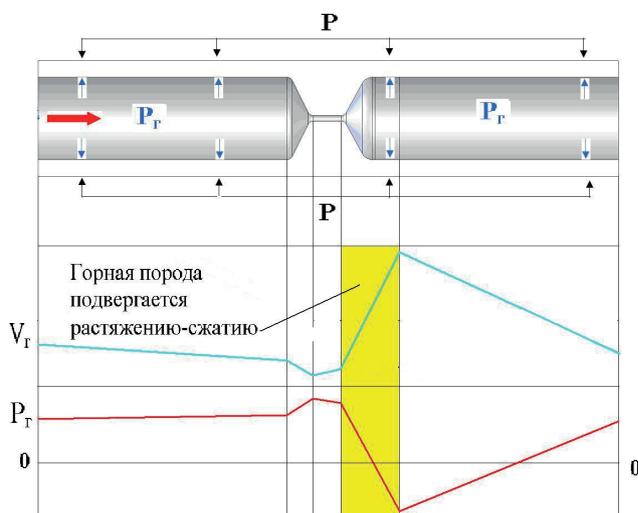


Рис. 8. Схема возможного характера распределения потенциальных участков деформации горной породы при газовом воздействии: P – горное давление;  $V_g$  – скорость течения смеси газов;  $P_g$  – давление смеси газов

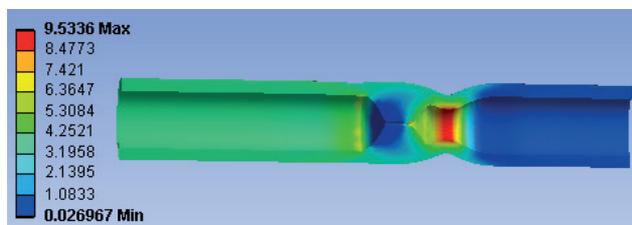


Рис. 9. Эквивалентные напряжения в горной породе при газовом воздействии (по Мизесу)

Из результатов, представленных на рис. 8, 9, следует, что наличие водорода в газовой смеси, движущейся в поровом пространстве плотной карбонатной породы, способствует возникновению перепадов давления, при которых наблюдаются знакопеременные деформации локальных участков отдельных пор, что в конечном итоге способствует их очистке от кольматантов и созданию системы микротрещин в призабойной зоне.

#### 4. Выводы

Сформирован массив граничных условий для математического моделирования процесса воздействия газовой смеси на горную породу.

Усовершенствован процесс подготовки к внедрению технологии комплексного водородного термобарохимического воздействия на продуктивный горизонт нефтяной или газовой скважины. С этой целью в компьютерную модель процесса фильтрации активных компонентов в пласт с учетом эффекта водородной активации диффузии были внесены изменения: проницаемость исследуемого материала задавалась не как константа, а в зависимости от режима и длительности водородного воздействия. Описание процесса разупрочнения горной породы и связанного с ним увеличения газовой проницаемости керна, полученное экспериментальным путем, представлено на рис. 3 и согласуется с данными полученными в результате расчета (рис. 4, б)

Компьютерное моделирование газодинамики течения газовой смеси с добавлением водорода в порах различной геометрии позволило получить представ-

ление об одном из механизмов процесса водородной активации диффузии в ПЗП.

Промышленные испытания технологии доказали, что рассмотренная в работе компьютерная модель, которая включает в себя базу данных по изменению проницаемости горной породы под воздействием водородной активации, позволяет более точно определиться с термогазодинамическими и теплообменными характеристиками процесса в призабойной зоне пласта на всех стадиях его обработки, а также позволяет выбрать наиболее эффективные режимы обработки ПЗП и снизить расход дорогостоящих реагентов. По данной технологии обработаны продуктивные горизонты нефтяных и газовых скважин на месторождениях Украины, Грузии, Китая и России, запасы углеводородов в которых по различным причинам (обводненность пласта, высокое содержание АСПО, низкая проницаемость и др.) относились к категории «трудноизвлекаемых». После проведения работ по интенсификации добычи с учетом эффекта водородной активации суточный дебит скважин увеличился от 1,5 до –10 раз, а продолжительность эффекта от применения технологии возросла в 2–5 раз.

#### Литература

1. Пат. 102501, Украина, МПК E21B 43/24 (2006.01), E21B 43/25 (2006.01) Способ комплексного водородного и термобарохимического воздействия на призабойную зону продуктивного пласта [Текст] / Кравченко, О. В., Велигоцкий, Д. О., Мацевитый, Ю. М., Симбирский, О. В. – Заявитель и патентодержатель Научно-технический концерн “Институт проблем машиностроения” НАН Украины. – № а 2013 03001. – Заяв. 11.03.2013. Опубл. 10.07.2013. Бюл. № 23.
2. Лебедев, Н. Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза [Текст] / Н. Н. Лебедев. – Москва: Химия, 1971. – 840 с.
3. Светлицкий, В. М. Проблемы увеличения производительности скважин [Текст] / В. М. Светлицкий, П. Н. Демченко, Б. В. Зарицкий. – Киев: Паливода, 2002. – 228 с.
4. Войтенко, Ю. И. О возможности изменения фильтрационных и прочностных свойств плотных пород-коллекторов на мезо- и наноуровне при взрывном и термобарохимическом воздействии [Текст] : тр. межд. науч.-прак. конф. / Ю. И. Войтенко, О. В. Кравченко, Д. А. Велигоцкий // Перспективы использования альтернативных и возобновляемых источников энергии в Украине (REU 2013), 2013. – С. 13–18.
5. Щербина, К. Г. Химико-физические основы высокотемпературного воздействия на призабойную зону скважины гидрореагирующими составами [Текст] : автореф. ... дис. докт. тех. наук. / К. Г. Щербина. – Киев: ОАО «Украинский нефтегазовый институт», 1999. – 34 с.
6. Яремийчук, Р. С. Повышение производительности скважин при освоении и эксплуатации месторождений парафинистых нефтей [Текст] / Р. С. Яремийчук, Г. П. Савьюк, В. М. Светлицкий. – Киев: Укрпипрониинетфть, 1993. – 225 с.
7. Кравченко, О. В. Водородная активация в процессах повышения проницаемости нефтегазоносных пород [Текст] / О. В. Кравченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 1, № 6 (61). – С. 21–25. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/9189/7984>
8. Fernandes, P. D. Simulation of Transient Pressure Behavior for a Well With a Finite-Conductivity Vertical Fracture [Text] / P. D. Fernandes, T. J. Oliveira, S. D. Souza et. all. // 5<sup>th</sup> Latin American CFD Workshop, Applied to the oil and gas industry, 2012. – P. 1–22.
9. Imperial College Consortium on Pore-scale Modelling [Electronic resource] / Available at: <http://www3.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/research/permporescalemodelling>
10. Malek, K. Knudsen self- and Fickian diffusion in rough nanoporous media [Text] / K. Malek, M. O. Coppens // Journal of Chemical Physics. – 2003. – Vol. 110, Issue 5. – P. 2801–2811. doi: 10.1063/1.1584652