

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПЛОТНЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО И НЕИДЕАЛЬНОГО ГРАНУЛЯРНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

М.Ю. Зубков, А.А. Ишков

ООО «ЗапСибГЦ», г. Тюмень, ZubkovMYu@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

*Рассмотрены результаты экспериментов по уплотнению идеальных и неидеальных гранулярных коллекторов, представленных недеформированной и деформированной дробью трех типоразмеров. Изучены закономерности изменения фильтрационно-емкостных свойств идеальных и неидеальных моделей гранулярных коллекторов по мере их уплотнения. Оценена величина закрытой пористости в каждой из рассмотренных моделей гранулярных коллекторов.*

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

*Дробь, пластическая деформация, уплотнение, пористость, проницаемость, закрытая пористость.*

# SIMULATION OF COMPACTION PROCESS FOR IDEAL AND NON-IDEAL GRANULAR RESERVOIRS

M.Yu. Zubkov, A.A. Ishkov

ZapSibGC, LLC, Tyumen, ZubkovMYu@mail.ru

## ABSTRACT

*Results of compaction experiments in ideal and non-ideal granular reservoirs represented by undeformed and deformed beads of three typical sizes are considered. Regularities of reservoir properties alteration in ideal and non-ideal models of granular reservoirs upon compaction are analyzed. Sealed porosity parameter is evaluated in different models of granular reservoirs.*

## KEY WORDS

*Beads, plastic deformation, compaction, porosity, permeability, sealed porosity.*

Существует большое количество работ, посвященных поискам закономерностей в изменении пористости и проницаемости различных типов гранулярных осадочных пород по мере их погружения с построением кривых уплотнения. Установлено, что для каждого типа отложений существуют свои индивидуальные зависимости пористости и проницаемости от глубины их залегания, отличные от таковых для других отложений. В связи с этим возникает желание попытаться установить некие общие зависимости в изменении фильтрационно-емкостных свойств гранулярных коллекторов по мере их погружения и, соответственно, от степени их уплотнения. В настоящей публикации приводятся результаты исследований пористости и проницаемости моделей идеальных и неидеальных коллекторов в зависимости от степени их уплотнения (сжатия), а также оценена величина закрытой пористости в них в момент потери ими проницаемости.

**Аппаратура и методика проведения экспериментов.** Опыты проводились с использованием насыпных моделей, составленных из калиброванной дроби трех типоразмеров (2.4, 3.0 и 3.5 мм). Насыпные модели коллекторов, в которых использовалась исходная идеально круглая дробь, получили наименование идеальных, а деформированные зерна дроби после этих экспериментов, которые использовались в последующих опытах, были названы неидеальными.

Для изготовления насыпных образцов кроме дроби использовалась армированная латунная сетка с ячейками 0.25х0.25 мм и термоусаживаемая трубка (термоусадка) диаметром 35 мм, которая после термообработки прочно закрепляла подготовленные к экспериментам цилиндрические модели идеальных и неидеальных коллекторов, имевших диаметр 30 мм и длину около 30 мм.

После изготовления насыпных образцов определялись их геометрические размеры. Полученные образцы имели не совсем идеальную цилиндрическую форму, поэтому снималось по несколько замеров длины и диаметра (на разных уровнях по их высоте моделей). Из всех полученных значений находились средние величины их длины и диаметра. Эти данные использовались затем для расчета объема образцов и последующих определений их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС).

Проведение эксперимента включает в себя следующие определения:

– открытой пористости, которую мы для краткости будем называть ниже по тексту просто пористостью ( $K_n$ );

– абсолютной (по газу) проницаемости ( $K_{np}$ ) образцов газоволюметрическим методом;

– условий постепенно возрастающих значений всестороннего давления или обжима ( $P_{обж}$ ) вплоть до момента, когда  $K_{np}$  и  $K_n$  образцов становились равными нулю.

Для определения  $K_{np}$  и  $K_n$  описанным способом использовалась установка, схема которой изображена на рисунке 1.

Повышение давления осуществлялось ступенями с различной дискретностью. Базовыми давлениями для всех экспериментов служили значения от 2.5 до 20 МПа с шагом квантования 0.25 МПа.

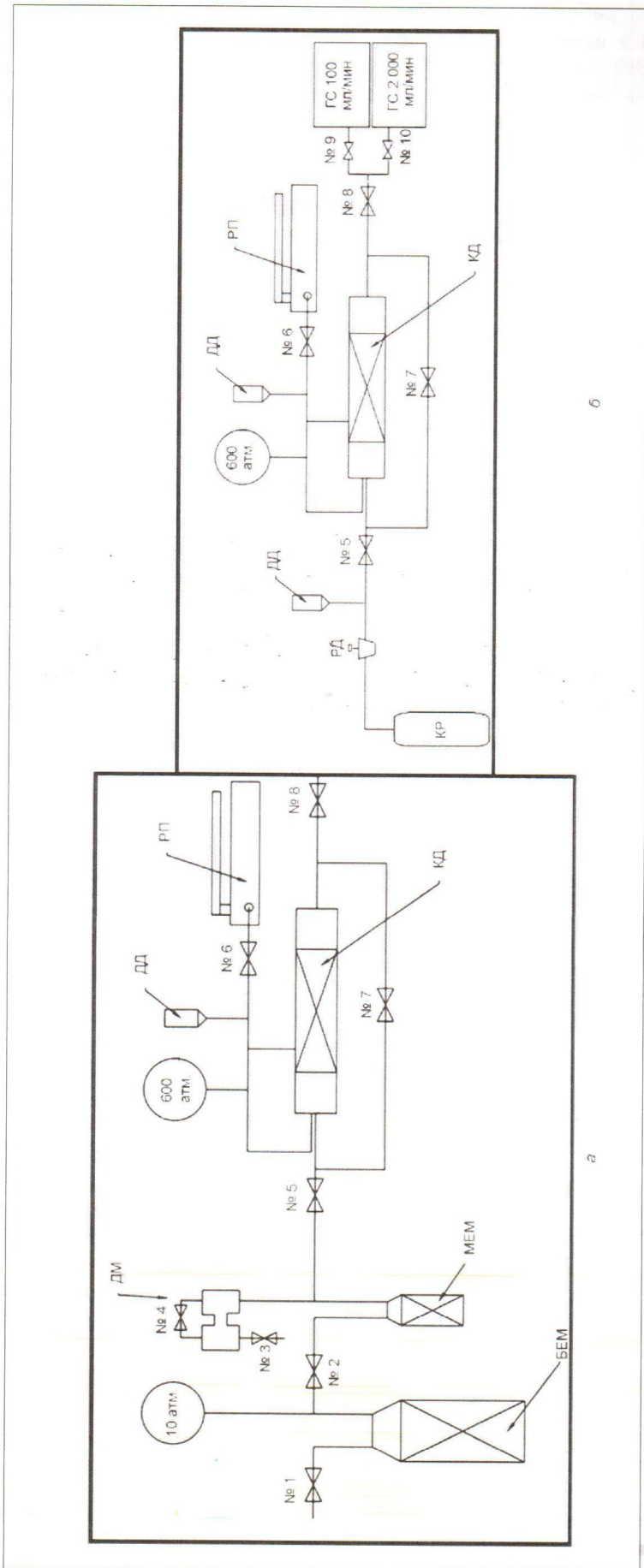
При каждом определенном значении  $P_{обж}$  производились замеры величин  $K_n$  и  $K_{np}$  образца. По этим данным строились зависимости  $K_n = f(K_{np})$ , которые затем аппроксимировались экспоненциальной кривой. По линии тренда вида  $K_n$  находились значения проницаемости, равные нулю, по которым, в свою очередь, определялись величины закрытой пористости ( $K_n^{закр}$ ) для каждой из моделей идеальных и неидеальных коллекторов, о чем более подробно будет сказано ниже.

Для каждого типоразмера идеальных и неидеальных моделей коллекторов проводилось по пять экспериментов.

**Результаты исследований.** Подготовленные для экспериментов насыпные модели имели пористость, варьирующую от 43 до 45 %, то есть они были достаточно «рыхлыми» и по величине пористости приближались к кубическому типу упаковки.

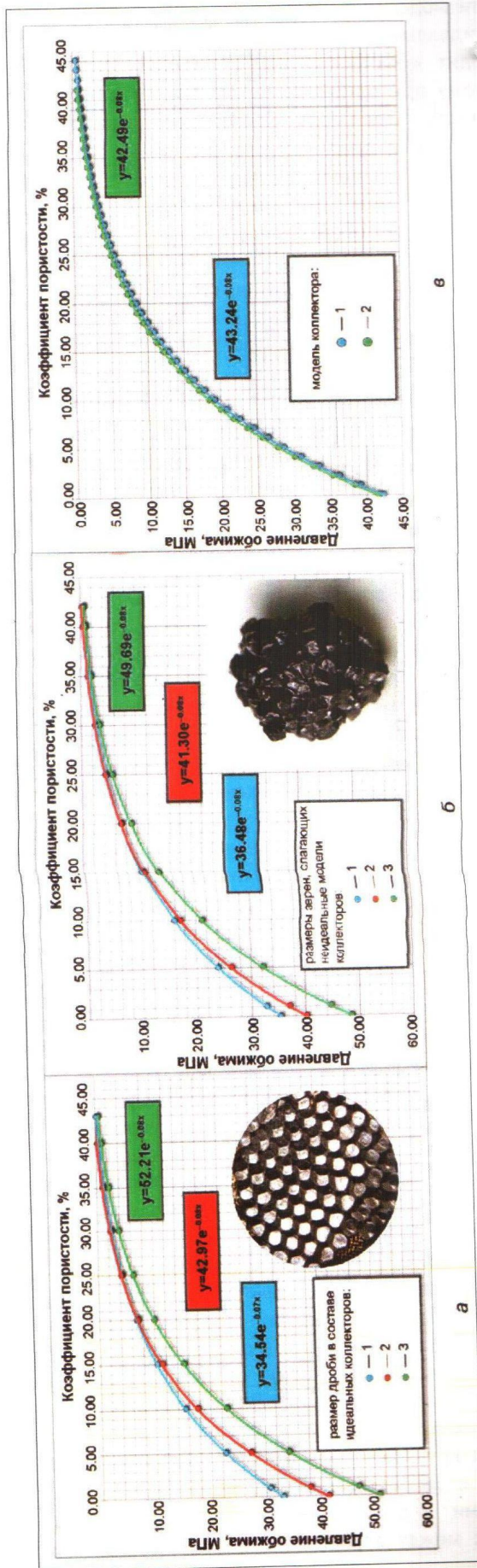
Анализ форм кривых уплотнений, связывающих друг с другом величину пористости и соответствующие им значения  $P_{обж}$ , построенных для идеальных моделей, состоящих из дроби трех различных размеров, показал, что до величин  $P_{обж}$ , составляющих порядка 10–12 МПа, уплотнение происходит достаточно быстро и их пористость примерно с 43–45 % уменьшается до 15–20 % (рис. 2а). При дальнейшем росте значений  $P_{обж}$  темп уменьшения величин  $K_n$  моделей заметно снижается, и лишь в интервале значений  $P_{обж}$  от 34.5 до 52.2 МПа ее величины становятся равными нулю. Минимальное значение  $P_{обж}$ , равное 34.5 МПа, требует, чтобы полностью исчезли все открытые поры в модели, состоящей из самой мелкой дроби. Максимальное значение  $P_{обж}$ , равное 52.2 МПа, необходимо, чтобы стала равной нулю открытая пористость в модели, сложенной самой крупной дробью (см. рис. 2а).

После экспериментов дробь, имевшая первоначально форму правильных шариков, в наиболее уплотненных участках стала похожей на ромбодекаэдр (см. рис. 2а, врезка). По закругленным граням в углах полученных многоугольных зерен можно на качественном уровне оценить величину



Условные обозначения:  
 ДМ — дифференциальный манометр;  
 МЕМ — малая емкость;  
 БЕМ — большая емкость;  
 КД — ядеродержатель;  
 РП — ручной пресс;  
 ДД — датчики давления;  
 КР — компрессор;  
 ГС — газосчетчик;  
 РД — редуктор;  
 — номерами обозначены краны.

Рис. 1. Гидравлическая схема установки для определения пористости (а) и проницаемости (б) газозольюметрическим методом в условиях различного эффективного давления обжигла



Условные обозначения:

- а:
- 1 — 2.40 мм;
  - 2 — 3.00 мм;
  - 3 — 3.50 мм;

- б:
- 1 — 2.40 мм;
  - 2 — 3.00 мм;
  - 3 — 3.50 мм;

- в:
- 1 — идеальная;
  - 2 — неидеальная.

Рис. 2. Зависимости пористости (Кп) от величины давления обжима (Робж) для идеальных (а) и неидеальных (б) моделей гранулярных коллекторов с различными размерами зерен, спалающимися их, а также обобщенные зависимости для идеальных и неидеальных коллекторов (в)

$K_n^{закр}$ , в которую не проникал газ при проведении замеров пористости (см. рис. 2а, врезка).

Кривые уплотнения, полученные для неидеальных моделей, построенных с использованием неидеальной (деформированной в предыдущих опытах) дробы, имели очень похожую форму (рис. 2б). Так же как и в опытах с идеальными моделями, в начале процесса уплотнения неидеальных моделей наблюдалось быстрое уменьшение их  $K_n$  под действием все возрастающей величины  $P_{обж}$ . При достижении ее значений, равных 10.0–12.0 МПа, их  $K_n$  снижается до 15–18% (рис. 2б). Наблюдается закономерное увеличение критических значений  $P_{обж}$  (как и в экспериментах, проведенных ранее) по мере роста размеров исходной деформированной дробы в составе моделей от 36.5 МПа в самой «мелкозернистой», состоящей из частиц размером 2.4 мм, до почти 50.0 МПа в наиболее «крупнозернистой», сложенной зернами диаметром около 3.5 мм, при которых  $K_n$  становится равной нулю (см. рис. 2б).

В отличие от идеальных моделей, дробь в которых после завершения экспериментов приобретала правильную многогранную форму (напоминающую, как уже отмечалось выше, ромбодекаэдр), в неидеальных моделях зерна дробы в большинстве случаев имели форму, далекую от идеальных многогранников (рис. 2б, врезка).

Усредненные кривые уплотнения для всех трех типоразмеров зерен, построенные для моделей идеальных и неидеальных коллекторов, расположились на графике рядом друг с другом (рис. 2в). Причем величина  $P_{обж}$ , при которой  $K_n$  становится равной нулю, для неидеальных коллекторов в среднем немного меньше, чем для идеальных — 42.5 и 43.2 МПа соответственно (см. рис. 2в).

Рассматриваемые модели идеальных и неидеальных коллекторов значительно отличаются от природных, гранулярных характером, зависимостей пористости от проницаемости  $K_n = f(K_{np})$ . Эти отличия заключаются в том, что в рассматриваемых идеальных и неидеальных моделях гранулярных коллекторов при их сравнительно невысокой открытой пористости (порядка 10–18% первые и 19–23% вторые) они обладают очень высокой проницаемостью, равной примерно 1 мкм<sup>2</sup> (рис. 3). По мере уплотнения моделей наблюдается быстрое уменьшение их проницаемости и более медленное снижение величины их пористости.

Для всех типоразмеров идеальных и неидеальных моделей коллекторов зависимости  $K_n = f(K_{np})$  для первых лежат ниже, чем для вторых (рис. 3), то есть уменьшение проницае-

мости моделей по мере снижения их пористости в неидеальных разновидностях коллекторов происходит «быстрее», чем в идеальных. Именно поэтому при одной и той же пористости проницаемость идеальных коллекторов значительно выше, чем неидеальных (см. рис. 3).

При значениях проницаемости менее 0.10–0.12 мкм<sup>2</sup> на зависимостях, связывающих между собой пористость и проницаемость моделей идеальных и неидеальных коллекторов, отмечаются точки перегиба, при переходе через которые по направлению к нулевым значениям  $K_n$  и  $K_{np}$  наблюдается очень быстрое уменьшение величин  $K_n$  и  $K_{np}$  (см. рис. 3).

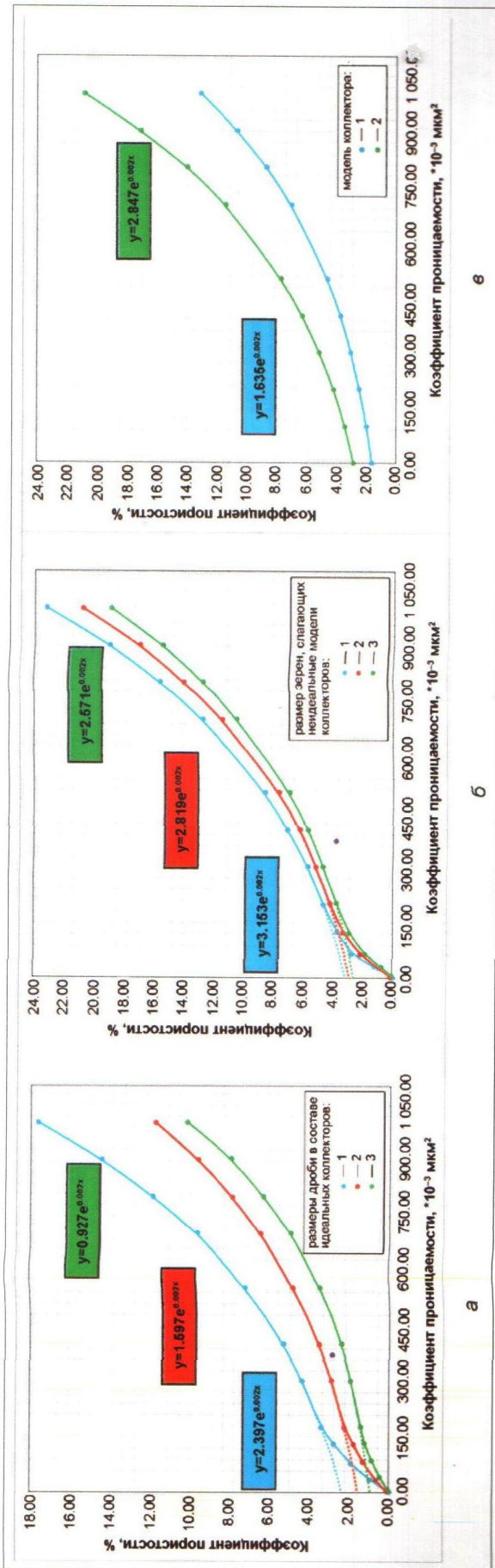
#### Обсуждение полученных результатов.

В отличие от обычных природных гранулярных коллекторов, уплотнение которых происходит не только путем их сжатия под влиянием нарастающего с глубиной литостатического давления, но и процессов растворения, переотложения (регенерация зерен кварца и полевых шпатов) и новообразования эпигенетических минералов (глинистый и карбонатный поровый цемент), рассматриваемые модели идеальных и неидеальных коллекторов уплотнялись лишь под действием всестороннего давления в результате пластической деформации слагающих их зерен (дробы).

Более быстрое уплотнение мелкой дробы по сравнению с крупной объясняется тем, что площади контактов мелких зерен друг с другом заметно меньше и увеличиваются медленнее по мере их сжатия (деформации), чем таковые у крупных зерен дробы, а значит, давление друг на друга соседних мелких дробинки при одной и той же величине  $P_{обж}$  значительно больше, чем у крупных (см. рис. 2а, 2б). Именно этим объясняется тот факт, что мелкая дробь быстрее (при меньших значениях  $P_{обж}$ ) уплотняется и теряет  $K_n$ , чем более крупная (см. рис. 2а, 2б).

Этой же закономерностью объясняется и тот факт, что модели идеальных коллекторов уплотняются чуть медленнее, чем неидеальные, или, вернее, для того чтобы они полностью потеряли  $K_n$ , их необходимо подвергнуть немного большему всестороннему давлению (см. рис. 2в). Действительно, модели неидеальных коллекторов сложены остроугольными зернами, которые при контактах друг с другом должны развивать в местах этих контактов высокие давления (под действием  $P_{обж}$ ) из-за малой площади этих контактов и поэтому быстро уплотняются (см. рис. 2б, вставка).

Высокая проницаемость моделей, сложенных крупными зернами или дробью по сравнению с мелкозернистыми, объясняется более крупными размерами каналов, расположенных между зернами в первых по сравнению



Условные обозначения: см. рис. 2.

Рис. 3. Изменения пористости ( $K_p$ ) и проницаемости ( $K_{пр}$ ) по мере уплотнения идеальных (а) и неидеальных (б) моделей гранулярных коллекторов, сложенных зернами разных размеров, а также обобщенные зависимости для тех же коллекторов (в)

с последними, и их меньшей извилистостью, чем во вторых (см. рис. 3).

Выше уже обращалось внимание на наличие на кривых, описывающих зависимости  $K_n = f(K_{np})$ , для различных моделей идеальных и неидеальных коллекторов точек перегиба, при переходе через которые наблюдается быстрое уменьшение пористости и проницаемости моделей (см. рис. 3). Можно предположить, что в этом интервале ( $K_n$  и  $K_{np}$ ) происходит интенсивное сжатие фильтрующих каналов, соединяющих поры, и последние переходят в разряд закрытых, теряя сообщаемость друг с другом. Иными словами, если экстраполировать полученные кривые, описывающие зависимости  $K_n = f(K_{np})$  до их пересечения с осью ординат ( $K_n$ ) при значении  $K_{np}$ , равном нулю, то мы получим величины  $K_n^{закр}$  (см. рис. 3).

Более высокая величина  $K_n^{закр}$  в моделях неидеальных коллекторов по сравнению с идеальными легко объясняется менее упорядоченной структурой порового пространства и большим числом ошибок в ее упаковке в первых, чем в последних. Гораздо более высокая проницаемость моделей идеальных коллекторов по сравнению с неидеальными объясняется теми же причинами, из-за чего в идеальных моделях коэффициент извилистости приближается к единице, а в неидеальных он заметно отличается от единицы в большую сторону.

В заключение обратим внимание еще раз на то, что полученные значения  $K_n^{закр}$  для идеальных и неидеальных моделей гранулярных коллекторов справедливы лишь для случая, когда уплотнение зернистых отложений осуществляется в результате пластической деформации зерен, слагающих осадок. Так, если кроме пластиче-

ской деформации уплотнение осадка происходит в результате растворения, кристаллизации (новообразования поровых минералов), регенерации и других процессов, то величина закрытой пористости будет отличаться от полученных значений, а процессы уплотнения осадков будут описываться иными зависимостями.

Из вышесказанного можно сделать определенные выводы.

1. Кривые уплотнения идеальных и неидеальных моделей гранулярных коллекторов описываются экспоненциальными функциями, из которых следует, что сначала уплотнение протекает достаточно быстро, но, начиная с давлений обжима около 10–12 Мпа, скорость уплотнения заметно снижается.

2. Чем крупнее зерна, слагающие гранулярные модели коллекторов, тем большие давления требуются для их уплотнения.

3. При прочих равных условиях для уплотнения идеальных моделей гранулярных коллекторов требуются немного более высокие давления обжима, чем для неидеальных моделей.

4. Модели, состоящие из более крупных зерен, обладают гораздо более высокой проницаемостью, имея одинаковую пористость.

5. Закономерное уменьшение величины закрытой пористости по мере увеличения размеров зерен, слагающих гранулярные модели, объясняется увеличением значений давления всестороннего обжима в этом же направлении, необходимого для перекрытия каналов фильтрации в моделях со все увеличивающимся размером зерен или дроби.

6. Неидеальные коллекторы уплотняются «быстрее», сохраняя при этом большую по величине, чем в идеальных коллекторах, закрытую пористость.