

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЛЬРАЦИИ
НА ПЕСЧАНЫХ ОБРАЗЦАХ^{*})

Ф.ЭНГЕЛЬМАН, студент из ГДР,
У курс, МГРИ

В настоящее время внимание гидрогеологов привлечено [1, 8, II] к проблеме медленных течений подземных вод в песчано-глинистых породах нижнего этажа гидролитосфера, который характеризуется наличием значительных объемов тонкодисперсных пород с субкалиплярным поровым пространством, в котором резко могут проявиться молекулярные взаимодействия твердой и жидкой фаз (скелет - подземная вода), а также наличием чрезвычайно малых градиентов внешних сил, соизмеримых по величине с молекулярными взаимодействиями. Такие эффекты могут проявляться и при движении воды в песчано-глинистых породах верхнего этажа при наличии определенных условий.

Для зоны активного водообмена в песчано-глинистых пластах с градиентами потока более 10^{-3} - 10^{-4} принято считать справедливым закон Дарси:

$$v = K \cdot I \quad \text{или} \quad v/K = I \quad (1)$$

В глинистых породах с субкалиплярной пористостью на основе предпосылки сплошной среды обычно принимается закон вязкопластического течения II :

$$v \approx K(I - 4/3 I_0) \quad \text{или} \quad v/K + 4/3 I_0 = I \quad (2)$$

где I_0 - начальный градиент фильтрации, связанный с начальным сдвиговым усилием T_0 , имеющий по [II] порядок $n \cdot 10^{-4}$ для песка мелко- и среднезернистого и $n \cdot 10^{-3}$ - глинистого.

В последние годы на основе молекулярно-кинетической теории для глинистых пород при весьма медленных течениях получено [1]:

* Доклад прочитан на научной конференции МГРИ, 1987 г.

$$v = K_f I (1 - I_0/I)^2 \quad (3)$$

где K_f – коэффициент, отвечающий фильтрации по закону Дарси, I_0 – кинематическая характеристика, определяющая переход диффузионного движения молекул в фильтрационный поток, отвечающей понятию сплошной среды.

Для изучения фильтрационных свойств песчано-глинистых пород обычно используют лабораторные методы [2,3,6,7,10]. Заметим, что при достаточно удовлетворительном описании конструкций различных приборов, вопросам погрешностей определения коэффициентов фильтрации, анализу качественной картины фильтрации и работы используемых в лабораториях серийных приборов, удалено очень мало внимания. В свете вышесказанного эти вопросы становятся актуальными. Некоторые из них рассматриваются в данной статье.

Ставилась задача выявить, могут ли в лабораторных опытах на песчаных образцах проявиться молекулярные взаимодействия системы вода — порода, какие действуют другие факторы, с чем они могут быть связаны и какую величину имеют. Задачи включали также изучение видов и характера погрешностей, появляющихся при определении коэффициента фильтрации на стандартном лабораторном оборудовании, исследование причин появления погрешностей и разработка рекомендаций, повышающих достоверность определения коэффициента фильтрации.

Экспериментальные исследования в песках выполнены на приборах КФЗ. Коэффициент фильтрации определен в условиях установившегося движения с учетом изменения вязкости фильтрующейся воды. Исследования проведены на песках со следующим граносоставом:

Таблица 1

Песок \ Фракция, мм	3,0–2,0	2,1–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	<0,1
1. Мелкозернистый		6,8		25,5	57,5	10,02
2. Среднезернистый	0,05	0,5	2,8	73,55	22,5	0,6

Эксперименты выполнены по методике, подготовке и ходу опыта, как описано в работе [2]. Через испытуемый образец в резущем стакане пропускалась вода в течение заданного интервала времени t (для песка 1 - 300 с; для песка 2 - 150 с), который обеспечивал, что количество профильтировавшейся воды ΔV было больше 10 см^3 и точность отсчета по сосуду Мариотта была достаточно высокой. При каждом эксперименте значение коэффициента фильтрации определялось для удобства сравнения при $T = 10^\circ\text{C}$ по формуле Дарси:

$$K_{10} = \Delta V / t \cdot I \cdot F (0,7 + 0,03 T) \quad (4)$$

где I - градиент напора; F - площадь резущего стакана, 25 см^2 ; T - температура воды при опыте, $^\circ\text{C}$. Всего было определено 310 значений K_{10} при разных градиентах напора на песке 1 и 65 определений на песке 2.

Для экономии времени расчеты выполнялись на программируемом микроСБИЛЧере по программе:

$$\begin{aligned} &\text{ИП1 ИП2} \times \text{ИП3} + \text{ИП4 ИП6 ИП5} \times \text{ИП7} \\ &+ F \frac{1}{t} \times \text{ИП4} \times \text{СН}, \end{aligned}$$

согласно которой вводилось $A = 864/t \cdot F = \text{const}$ в регистр 1; ΔV в рег. 2; I в рег. 3; T в рег. 5; 0,03 в рег. 6; 0,7 в рег. 7.

Первые же опыты показали значительную величину так называемого фиктивного начального градиента $I_\phi = 0,22-0,3$ (рис. 1), что существенно превышало теоретические расчеты [3]. Такие значения "начальных градиентов" отмечались по словам профессора И.К. Гавич всегда при проведении лабораторных определений коэффициентов фильтрации в лаборатории МГРИ. Для изучения этого эффекта погрешности определения коэффициента фильтрации были разделены на две группы: 1) погрешности оборудования и 2) методологические погрешности. Рассмотрим их последовательно.

I. Погрешности оборудования.

Изучалось влияние: а) материала, из которого изготовлен прибор (металл, пластмасса), б) качества прибора в целом, в) качество и условия работы сосуда Мариотта, г) наличия сеток, д) сколостенной фильтрации.

а) Для оценки ошибок, связанных с качеством материала, из которого изготовлен прибор, проведено 50 определений на песке I при использовании двух приборов с пластмассовым корпусом и такое же количество определений на том же песке с той же пористостью на двух приборах с металлическим корпусом. Полученные данные позволили сделать вывод, что обе модификации прибора работают с одинаковой точностью. Среднее значение коэффициента фильтрации составило 1,2 м/сут.

б) При использовании нескольких пластмассовых приборов (в ходе всех дальнейших исследований использовались только эти приборы) установлено, что качество их изготовления и технология опыта существенно влияют на результаты опыта. Проведено 120 определений над песком I на 4-х приборах. Использовался постоянно один режущий стакан, заполненный этим песком при постоянной пористости. Полученные данные показали, что различные пластмассовые приборы дают при одинаковых значениях градиента напора в интервале 0,5-1,0 различные значения K_{10} . Расхождения составляют до 0,3 м/сут (до 40%). Это можно объяснить недоработками важных элементов прибора: 1) контакта сетка - сосуд Мариотта, 2) самого сосуда Мариотта, 3) предохранительной сетки.

в) Многочисленные эксперименты показали, что в процессе всех опытов добиться одинаковой степени соприкосновения сосуда Мариотта с сеткой и с грунтом весьма трудно. Наблюдается неравномерное поступление воды, разуплотнение и вынос песка на верхнюю латунную сетку. Изучалось также влияние столба воды в сосуде Мариотта на

точность определения K_{10} . Проведено 50 определений над песком I на одном приборе при $I = 0,5 = const$. Полученные результаты представлены на рис. 2 (кривая I). Было установлено уменьшение расчетного значения K_{10} на 25% с уменьшением в два раза (со 100 см^3 до 50 см^3) объема воды в сосуде Мариотта. При замене неполного сосуда на полный наблюдается снова резкое увеличение K_{10} (рис. 2, кривая I на а и б).

г) Оценка влияния сопротивления предохранительных сеток была в этой группе опытов основным фактором. Была принята гипотеза, что образование менисков на поверхности верхней сетки приводит к тому, что при значениях градиента $I_f < 0,35$ фильтрация не наблюдается (рис. 1). Такие значения градиента были установлены в опытах для мелковернистого песка (см.табл. I). Данные из 100 определений K_{10} над среднезернистым песком (табл. I) показали, что фактическое значение градиента, при котором визуально прекращается фильтрация, составляет 0,2 (рис. 3, кривая I). Для уменьшения влияния латунных сеток на условия фильтрации был проведен ряд экспериментов. Вместо верхней сетки был использован маломощный слой гравия (3-5% от общей длины образца). Нижняя сетка оставалась для предотвращения выноса мелких частиц. Проведено 120 определений K_{10} , из них 80 над песком I и 40 над песком 2. Полученные результаты представлены на рис. 1, 3 (кривая 2). Замена верхней латунной сетки маломощным слоем гравия привела, как видно из рис. 1, 3, к существенному снижению величины фактического начального градиента I_f . Оно уменьшается почти в 2 раза. Так значение I_f для песка I составляет 0,075, что ближе к возможной расчетной величине начального градиента для мелковернистого песка. Использование слоя гравия благоприятно влияет и на условия работы сосуда Мариотта (рис. 2, кривая 2). Выше указанное изменение от объема воды в сосуде практически не наблюдается. Среднестати-

ческое значение K_{10} в ходе всего опыта над песком I составляет 2,46 м/сут. При сравнении с экспериментами на приборе с сеткой абсолютное значение K_{10} увеличивалось с 1,77 м/сут до 2,46 м/сут. Все вышесказанное доказывает, что латунные сетки существенно влияют на условия фильтрации.

д) Необходимость рассмотрения влияния околостенной фильтрации определялась тем, что во всех экспериментах (300 определений K_{10}) наблюдалась одна и та же закономерность: увеличение градиента напора вызывало увеличение коэффициента фильтрации (рис. 4). Возможно это явление связано с пониженным сопротивлением на контакте песок-стенка внутреннего стакана. Для исключения пристенной фильтрации и повышения сцепления песка с боковой поверхностью внутреннего цилиндра был использован резиновый клей, с помощью которого песок приклеивался к стенке стакана. Проведено 35 определений. Полученные данные позволили сделать вывод, что пристенной фильтрации не наблюдается.

2. Методологические погрешности и особенности ведения опытов.

В качестве методологических погрешностей изучалось влияние направления изменения величины градиента в ходе опыта на значение K_{10} . Последовательное увеличение I (5 рядов определений K_{10}), начиная от $I = 0$, показало, что фильтрация становится заметной лишь при значениях $I_f = 0,55-0,7$ для песка I. Последовательное уменьшение I , начиная от $I = 1,0$, показывает для того же песка, что фильтрация прекращается при $I_f = 0,3-0,5$, т.е. при более низких градиентах. Эти результаты позволяют сделать вывод о предпочтительности опытов на КФЗ с градиентами в диапазоне от I от 0,5 в исходящей последовательности.

В процессе обработки полученных данных при исследовании фильтрации на мелкозернистом песке I была предпринята попытка исполь-

звать формулу (3) для определения начального градиента I_0 .

Для этого она была преобразована, как указано в [1], к виду:

$$\sqrt{I} = k = K_f (1 - I_0/I)^2 \quad \text{или} \quad K/K_f = (1 - I_0/I)^2 \quad \text{и окончательно}$$

$$\sqrt{K/K_f} = 1 - I_0 \cdot 1/I \quad (4)$$

Зависимость (4) показывает, что построив по экспериментальным данным график в координатах $\sqrt{K/K_f} \div 1/I$, значение начального градиента I_0 определяется графически как тангенс угла наклона прямой к оси \sqrt{I} (рис. 5).

Проведено всего 15 определений значения I_0 по графикам (рис. 5). Вычисленные значения I_0 по формуле А.Г.Арье (4) соответствуют тем значениям, которые определялись выше по формуле вязкопластического движения (2) и представлены в табл. 2.

Таблица 2

I_0	$v = k(I - 4/3 I_0)$	$v = K_0 I (1 - I_0/I)^2$
Песок I с сеткой	0,22	0,26
Песок I с гравием	0,075	0,01

Рассмотрим еще другое интересное явление, которое присутствует на графиках рис. 1, 3, 4, 5. При значениях $I = 0,5 - 0,65$ наблюдается точка перелома, свидетельствующая о разном характере изменения K_{10} от I . Так из рис. 4 видно, что до

$I = 0,5-0,6$ отмечается высокая интенсивность изменения K_{10} от I при значениях $I > 0,5-0,6$ наблюдается примерно постоянное значение K_{10} .

По-видимому [2,3,5,9] это связано с тем, что по мере роста I часть физически связанный воды переводится в свободную, следует увеличение суммарной площади сечения потока и K_{10} увели-

чавается. После того, как все возможное количество физически связанный воды переведено в свободную, рост K_{10} прекращается. Основываясь на этом, запишем, как это сделано для верхнего предела закона Дарси в [II], обобщенный закон для фильтрации в песчано-глинистых породах в виде:

$$I = v/K (1 - \alpha v) \quad (5)$$

где параметр нелинейности, определяется из графиков. Все полученные экспериментальные данные для песков I и 2 были представлены согласно формулы (5) в графиках I/V_{10} от v_{10} . Оказалось, что при использовании обобщенного закона Дарси (5), тоже наблюдается перегиб (рис. 6). Это может указать на работу различных по диаметру поровых каналов. Этот перегиб был получен в опытах с секткой и с гравием. Анализ данных показал, что расчетные значения K_{10} более точно лежат на осредненной кривой при $I > I_p$ (I_p - значение напорного градиента для точки перегиба). Это хорошо выполняется для песка I после обработки методом наименьших квадратов [4] и последующем осреднении прямых для значения $I > 0,65$ (рис. 1). Аналогичная картина получена для данных песка 2.

Выводы

Результаты экспериментов позволяют высказать следующие рекомендации по постановке и проведению опытов на КБЗ с целью достоверного определения K_{10} .

1. Целесообразно подготовку и ход опыта вести как описано в работе [2], выполняя не менее 5-7 определений на один образец.
2. Вести все определения коэффициентов фильтрации на один и тех же приборах.
3. Для повышения сцепления песка с боковой поверхностью внутреннего цилиндра желательно смазывать внутреннюю

поверхность этого цилиндра резиновым kleем. 4. Эксперимент должен осуществляться при последовательном уменьшении напорного градиента от 1 до 0,5. 5. Вместо верхней предохранительной сетки использовать слой в 3-5 мм гравия. 6. Для контроля в процессе опыта строятся графики V_{10} от I , K_{10} от I и I/V_{10} от V_{10} , по которым определяется значение I_p . 7. В качестве расчетного значения коэффициента фильтрации принимается осредненная величина, определенная в интервале $I > I_p$. 8. При изучении фильтрации в тонкодисперсных породах целесообразно строить графики на основе формул (4) и (5). 9. Проблема оценки достоверности лабораторных определений коэффициентов фильтрации является актуальной и требует дальнейших исследований.

В заключении автор выражает благодарность проф. И.К.Гавич за помощь и ценные советы при выполнении данной работы.

Литература

1. Арье А.Г. Физические основы фильтрации подземных вод. М., Недра, 1984.
2. Гавич И.К., Мучешва А.А., Семенова-Брофеева С.М. Сборник задач по общей гидрогеологии. М., Недра, 1985.
3. Гольдберг Б.М., Скворцов Н.Н. Проницаемость и фильтрация в глинах. М., Недра, 1986.
4. Дяконов В.Н. Справочник по расчетам на микрокалькуляторах. М., Наука, 1985.
5. Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. М.: 1957.
6. Каменский Г.И. Основы динамики подземных вод. Ч. 1. Гидрогеологическая лаборатория и основные законы фильтрации. М.Л.: ОГИИ, 1953.

7. Максимов В.М. Справочное руководство гидрогеолога. Изд. Недра, Ленинградское отделение. Л.: 1967.
8. Основы гидрогеологии - гидроэодинамики. Изд. Наука, Сиб. отд. Новосибирск, 1983.
9. Сергеева Е.М. Теоретические основы инженерной геологии. М., Недра, 1986.
10. Чаповский В.Г. Лабораторные методы по грунтоведению и механике грунтов. М.: Недра, 1975.
11. Шестаков В.Н. Динамика подземных вод. Изд. МГУ, 1979.

ПОДГРУППОЧНЫЕ ПОДВИСЫ

к статье Ф.Эгельмана "Экспериментальные исследования по фильтрации на песчаних образцах"

Рис. 1. Статистические графики зависимости $V_{10} = f(I)$ для мелкозернистого песка I.

Сплошные кривые получены методом наименьших квадратов при использовании в синтаксах: 1 - верхней предохранительной сетки; 2 - маломощного слоя гравия. Чертежир - предполагаемый график, отвечающий движущим согласию уравнения (4) или (5). Остальные обозначения см. в тексте.

Рис. 2. Графики зависимости K_{10} от объема V воды, находящейся в сосуде Маркотта прибора КМЗ при градиенте напора $I = 0,5$ для песка I.

Кривые при использовании: 1 - верхней предохранительной и латунной сетки; 2 - слоя гравия; после замены неполного сосуда Маркотта на полный: а - первый раз; б - второй раз.

Рис. 3. Статистические графики зависимости $V_{10} = f(I)$ для среднезернистого песка 4.

Условные обозначения см. на рис. 1.

Рис. 4. Графики зависимости K_{10} от напорного градиента для песка I (с использованием слоя гравия вместо латунной сетки).

Сплошная линия - статистический график; линии а, б, в, г - экспериментальные. I_n - значение напорного градиента для точки перегиба.

Рис. 5. Статистические графики зависимости $\sqrt{K/K_f} = f(1/I)$ для мелкозернистого песка I.

Кривые при использовании: 1 - верхней латунной сетки. $I_0 = 0,08$; 2-слой гравия вместо сетки $I_0 = 0,01$. I_0 - начальный градиент для участка кривой справа от точки перегиба.

Рис. 6. Графическое представление в координатах $I/I_{10} \div v_{10}$ особого вида закона фильтрации в песчано-глинистой среде $I = v/k(1 - \alpha v)$ по экспериментальным данным на монолите песка с использованием латунной сетки.

Сплошная линия - статистический график, линии а, б, в, г - экспериментальные.

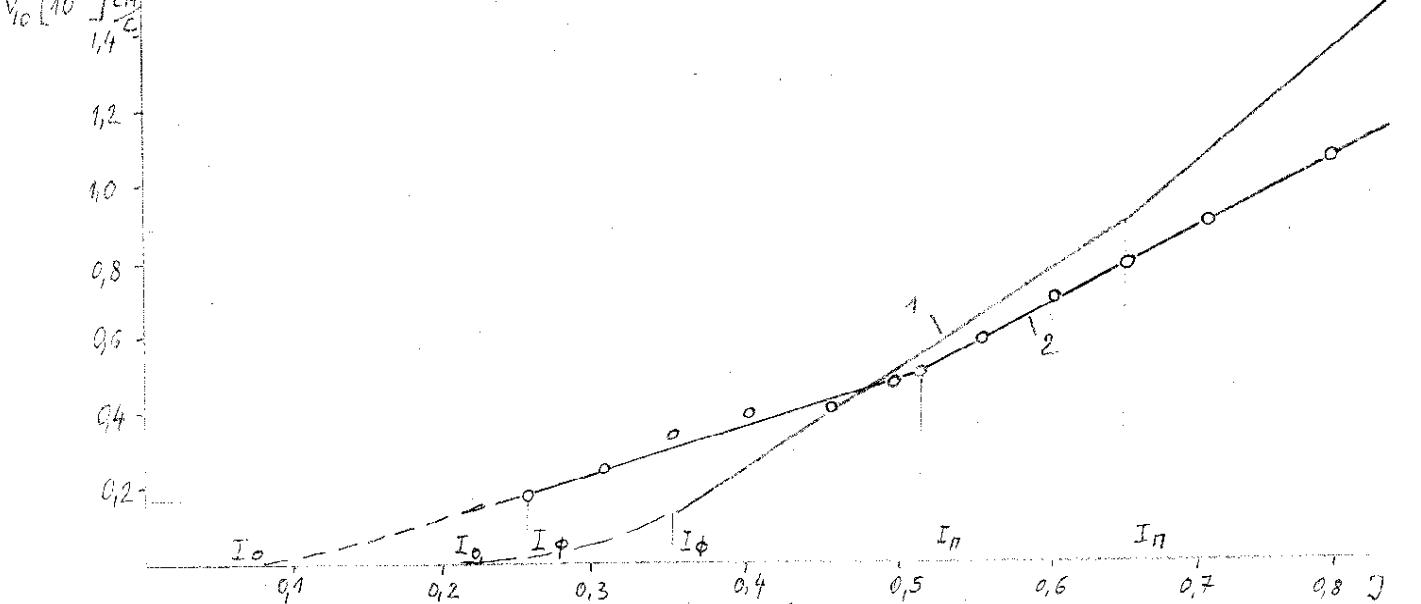


Рис.1 График зависимости $V_{10} = f(I)$ для песка 1 (см. табл.1) Кривая 1: при использовании верхней латунной сетки и последующей обработке данных методом наименьших квадратов [4] кривая 2 - при использовании слоя гравия; I_0 - начальный градиент I_ϕ - фиктивное значение градиента напора I_n - значение градиента напора где имеет место перегиб

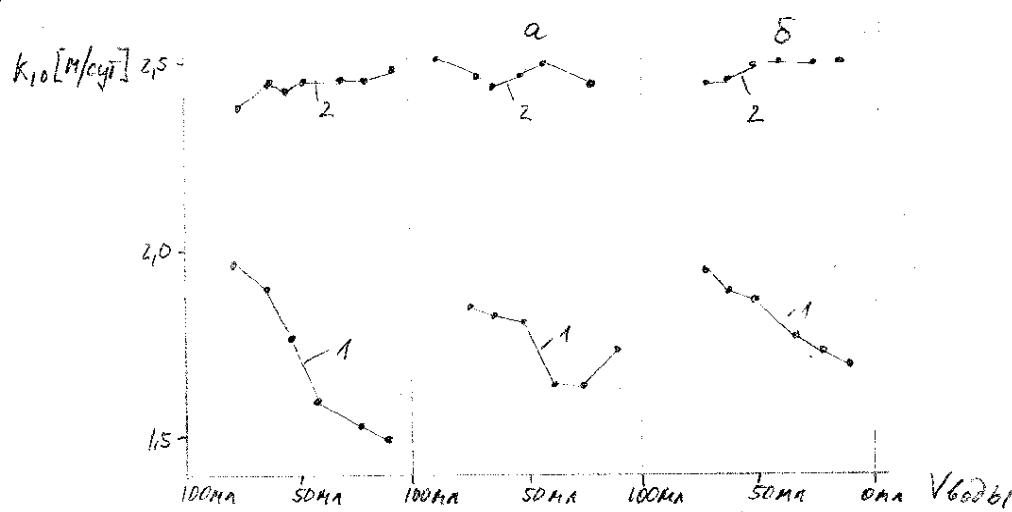


Рис.2 График зависимости $k_{10} \div V_{10}$ при градиенте напора $I=0.5 = \text{const}$, для песка 1 (см. табл.1)
1- кривая при использовании верхней латунной сетки
2- кривая при использовании малокомпактного слоя гравия
а- после замены неполного сосуда Мариотта на полный
б- после 2. замены

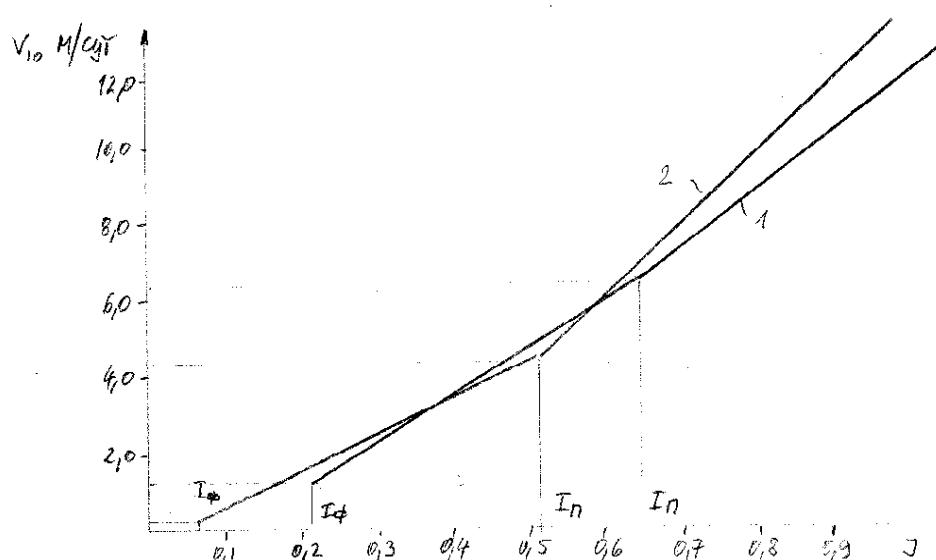


Рис.3 График зависимости $V_{10} = f(I)$ для песка 2 (см. табл.1)
обозначения см рис 1.

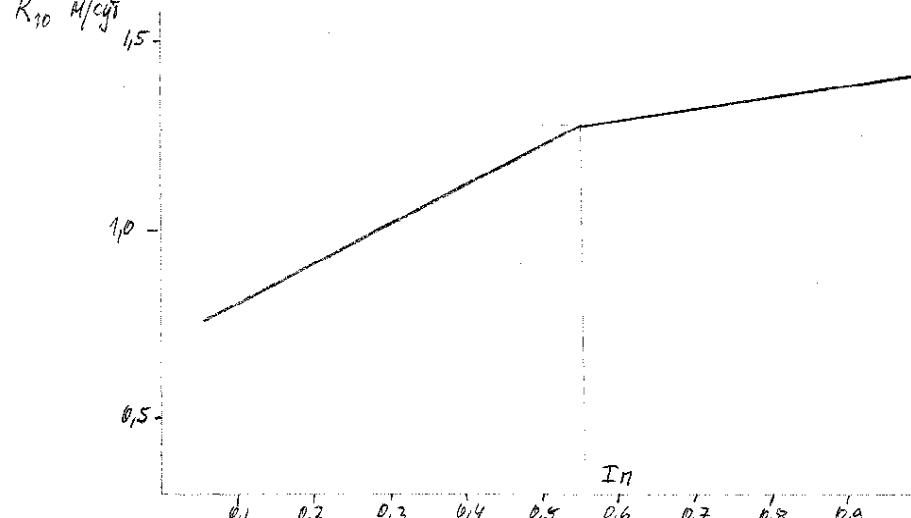


Рис 4 График зависимости K_{10} от напорного градиента I_n
 I_n - значение напорного градиента при котором
 визуально определяется перегиб в графиках, для
 песка 1 (см. табл 1) с использованием сноса зравия

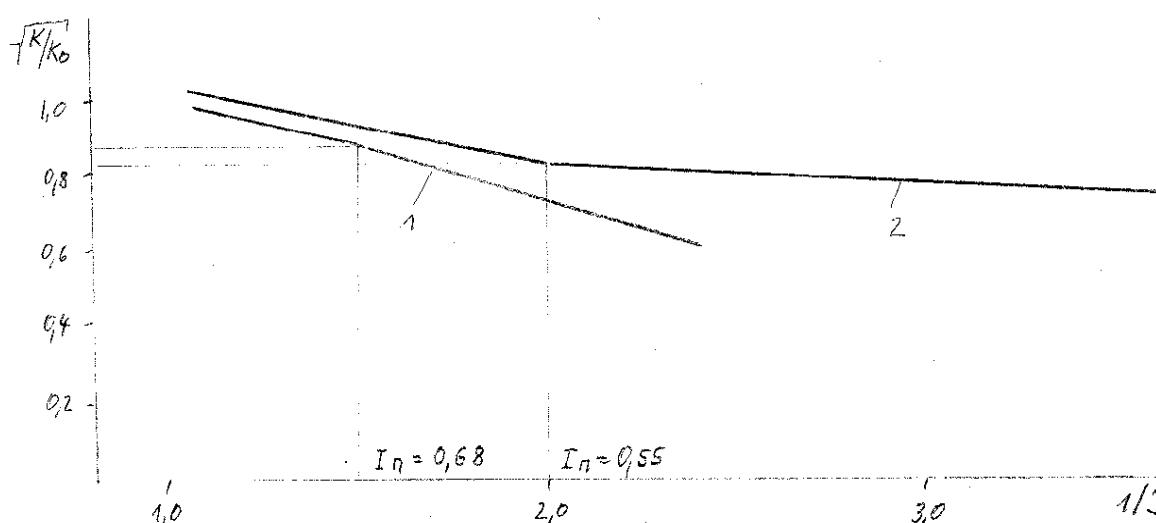


Рис 5. График зависимости $f^{K/K_0} = f(1/I)$, обозначения см. рис 1.
 Кривая 1 - $I_0 = 0,26$; кривая 2 - $I_0 = 0,02$ (определения
 велись над песком 1 (см. табл. 1))

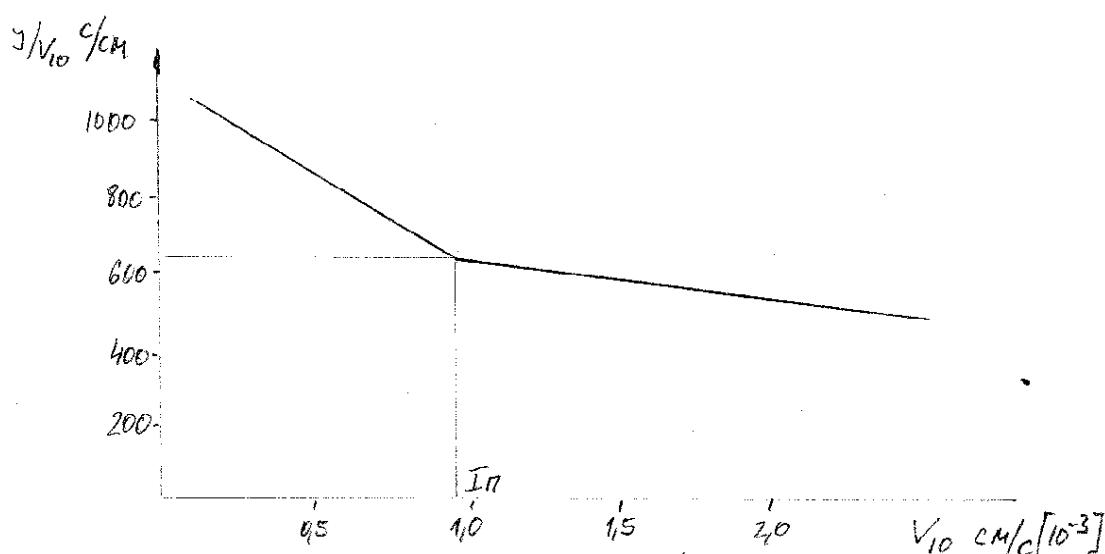


Рис 6. График зависимости Σ/V_{10} от V_{10} по эксперимен-
 там над песком 1. с использованием сетки.