

Г. М. Ломизе

### Движение воды в щелях

(Представлено И. В. Егиазаряном 6 XII 1946)

В работе приняты следующие буквенные обозначения:

$\rho$ —плотность воды.

$\mu$ —коэффициент вязкости.

$\nu$ —коэффициент кинематической вязкости.

$g$ —ускорение силы тяжести.

$I$ —гидравлический градиент.

$v$ —средняя скорость движения воды в щелях или в зернистом грунте.

$\delta$ —раскрытие щели.

$d$ —диаметр зерен однородного зернистого грунта.

$\pi$ —пористость грунта.

$e$ —абсолютная шероховатость стенок щели или поверхности частиц зернистого грунта.

$\varepsilon$ —относительная шероховатость, равная  $\frac{e}{\delta}$  для щелей и  $\frac{e}{d}$  для зернистых грунтов:

$\Phi$ —безразмерная, характеризующая тип шероховатости или форму и шероховатость частиц зернистого грунта.

$W$ —сила сопротивления движению.

$Re$ —число Рейнольдса, отнесенное к гидравлическому радиусу.

$i$ —коэффициент сопротивления.

$S$ —стандартная длина, равная  $\delta$  для щелей и  $d$  для зернистых грунтов.

Решение важных задач гидротехники требует развития современных представлений о фильтрации в трещиноватых грунтах.

Исследование движения трещинных вод должно идти в трех направлениях: первом,—изучающем горную породу, как среду, содержащую грунтовые воды; втором,—исследующем гидравлику движения трещинного грунтового потока; третьем,—устанавливающим характер и величину действия трещинного потока на породу и искусственные сооружения.

Наши исследования, исполняемые в Институте геологических наук Академии Наук Армянской ССР и в Закавказском научно-исследователь-

ском институте водного хозяйства, охватывают изучение трещиноватости горных пород и движения грунтовых вод по трещинам.

Сообщаемые ниже главные результаты относятся к проведенному нами изучению напорного движения воды в одиночной щели с шероховатыми стенками, представляющего собою простейший элемент более сложного движения трещинного грунтового потока.

Движение воды в шероховатых щелях заключено между двумя предельными случаями, к которым оно стремится по мере изменения

относительной шероховатости щели  $\varepsilon = \frac{e}{\delta}$ . При  $\varepsilon \rightarrow 0$  движение, начи-

ная с некоторого значения  $\varepsilon$ , подчиняется закону движения воды в гладких щелях; при возрастании  $\varepsilon$  движение, отдаляясь от указанного предельного случая, приближается к другому своему пределу, к движению в зернистых однородных грунтах. Поэтому, наряду с исследованиями движения воды в шероховатых щелях, мы подвергли изучению движение воды в гладких щелях и в зернистых однородных грунтах.

Перечисленные виды движения в щелях и в зернистых однородных грунтах представляют собою частные случаи общей задачи напорного равномерного движения жидкости внутри твердых стенок. Эти виды движения определяются факторами  $W, \mu, \rho, S, e, \Phi, \nu$ , а для зернистого грунта дополнительно пористостью  $m$ .

Разрешаемая задача сводится к определению вида функциональной зависимости (1) между перечисленными величинами.

$$W = F(\mu, \rho, S, e, \Phi, m, \nu). \quad (1)$$

Перейдя к общепринятым безразмерным величинам, получим выражение (2), тождественное выражению (1)

$$i = \varphi(Re, \varepsilon, \Phi, m), \quad (2)$$

где

$$i = \frac{l \delta g}{\nu^2}, \quad (3)$$

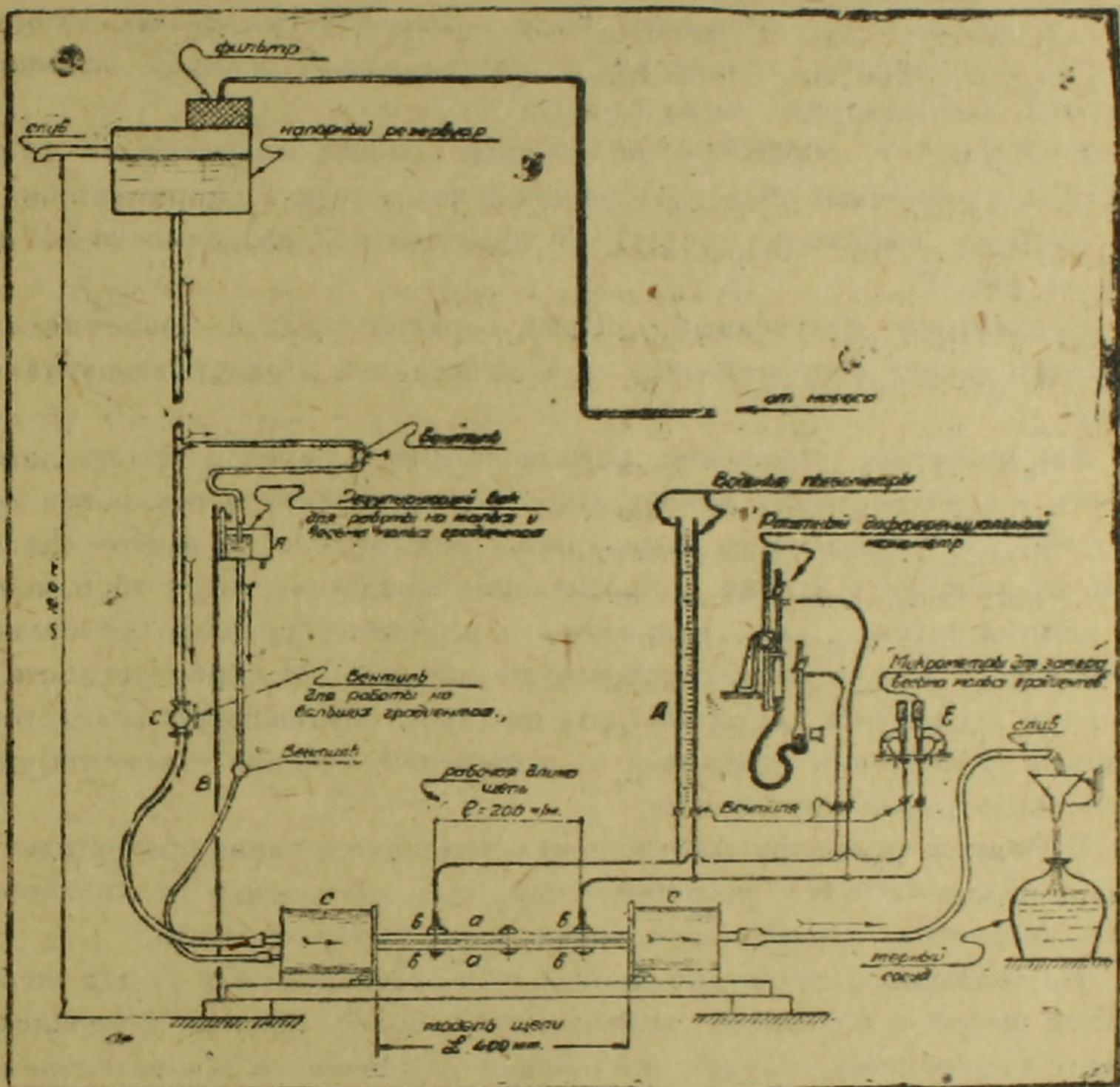
$$Re = \frac{\nu \delta}{2\nu}. \quad (4)$$

Для однородного зернистого грунта  $i$  и  $Re$  определялись по (3) и (4), как для щелей с помощью формул Слихтера, причем схематизируя структурное сложение, принималось, что зерна грунта уложены правильными рядами, и каждые восемь соседних зерен образуют ромбоэдр, рассмотренный в исследованиях Слихтера. При этом полагали, что две поверхности, проходящие через центры соседних рядов зерен, представляют собою стенки фиктивной шероховатой щели. Благодаря такой обработке результаты наших исследований со щелями и с зернистыми грунтами были приведены к сравнимой форме.

В наших опытах с зернистыми грунтами  $\varepsilon$  и  $\Phi$ , с достаточной

степенью точности, можно принять постоянными. В опытах со щелями тип шероховатости один и тот же, следовательно постоянно Ф.

В проведенных экспериментах моделировалось напорное равномерное движение воды в щелях с гладкими или шероховатыми стенками и в зернистых однородных грунтах. Схема опытной установки для щелей показана на фиг. 1.



Фиг. 1

Основной задачей опытов являлось нахождение зависимости (2) для изучаемых видов движения напорного руслового потока. С этой целью в опытах замерялись расход потока и отвечающий ему потерянный на сопротивления напор. Одновременно фиксировалось раскрытие щели  $\delta$  или  $d$  и  $m$  для зернистых грунтов.

Всего исполнено опытов:

- 1) в гладких щелях—9 при  $Re$  от 1,5 до 5200 и  $\delta$  от 0,05 до 0,5 см.
- 2) в шероховатых щелях—16 при  $Re$  от 3 до 9000,  $\delta$  от 0,068 до 1,017 см и  $\varepsilon$  от 0,054 до 0,810.
- 3) в однородных зернистых грунтах—5 при  $Re$  от 0,18 до 400,  $d$  от 0,065 до 0,55 см.

Результаты исследований представлены графически на фиг. 2 в виде логарифмической анаморфозы зависимости (2).

Вся область движения в шероховатых щелях, как отмечалось и как ясно показывает график фиг. 2, заключена между двумя экспериментально установленными предельными случаями напорного движения воды. Нижним пределом является движение воды в гладких щелях, верхним пределом служит движение воды в зернистом однородном грунте. Изменяясь внутри области, очерченной указанными двумя видами движения, сопротивление движению воды в шероховатых щелях испытывает ряд закономерных изменений в зависимости от величин основных изученных безразмерных характеристик  $Re$  и  $\varepsilon$ .

В результате обработки полученных данных мы раскрыли функцию (2) для различных областей изменений коэффициента сопротивления  $\zeta$ . Эти частные выражения общей функциональной зависимости (2) даются на фиг. 2.

Рассмотрим полученный опытно верхний предел применимости линейного закона сопротивления для движения в зернистых грунтах и щелях.

Как известно, изменение режима потока и переход его от ламинарного к турбулентному меняет закон сопротивления и отклоняет его от линейного, отвечающего ламинарному режиму. Но не всякое отклонение от линейного закона сопротивления свидетельствует об изменении режима потока. Так, например, в зернистых грунтах отклонения от линейного закона начинаются раньше зарождения турбулентности и являются следствием действия сил инерции, возникающих вследствие кривизны траекторий движения и изменений сечений элементарных струек фильтрационного потока.

В гладкой щели, при достаточном устранении влияния обстоятельств входа, можно считать установленным, что отклонения от линейного закона являются следствием возникновения турбулентности.

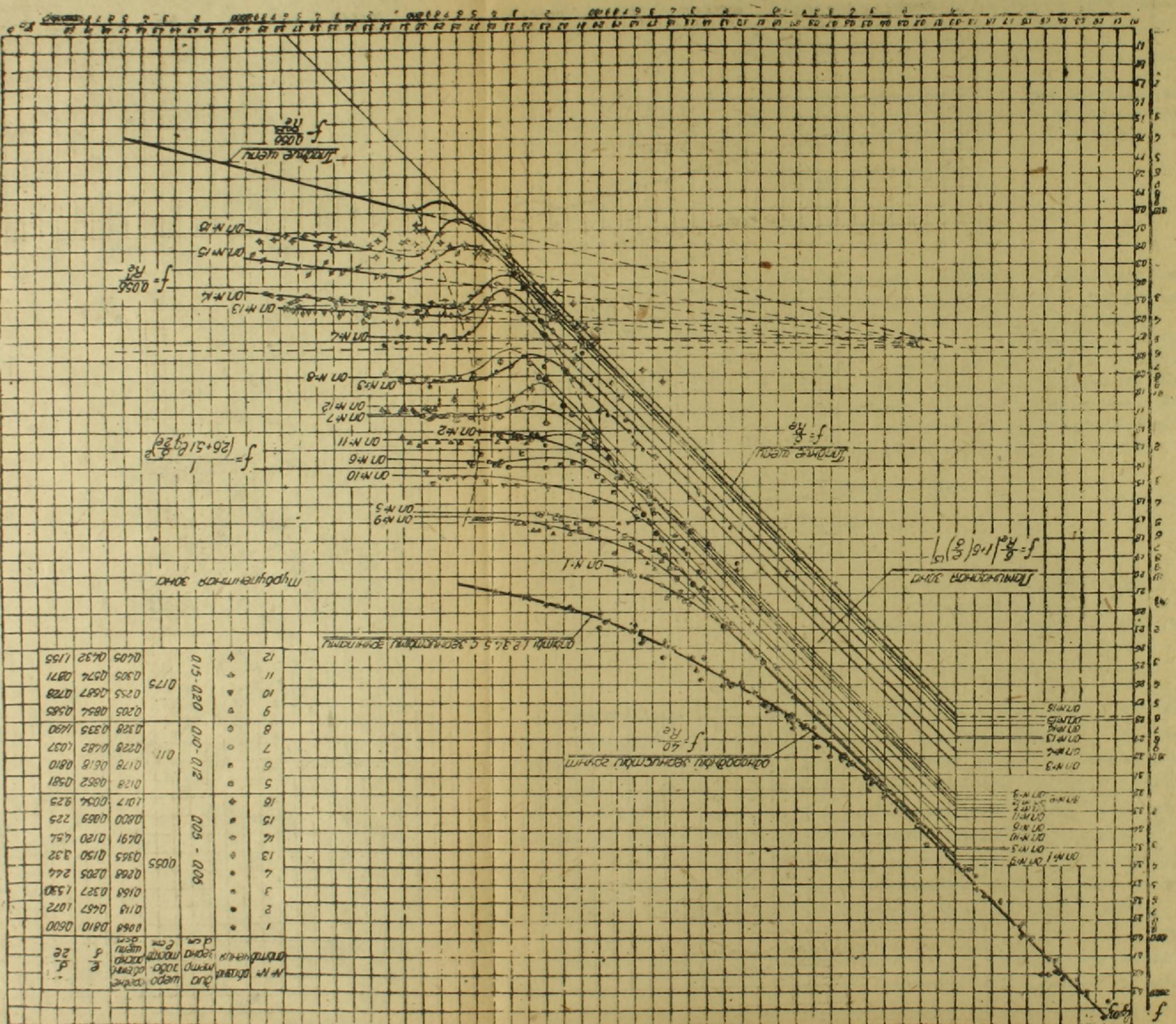
Из сказанного не трудно прийти к заключению, что: 1) для шероховатых щелей с большими значениями  $\varepsilon$ , более близких к верхнему пределу (зернистому грунту), отклонение от линейного закона начнется раньше зарождения турбулентности и тем раньше чем больше  $\varepsilon$ , 2) для шероховатых щелей с меньшими значениями, тяготеющих к нижнему пределу (гладким щелям), граница отклонения от линейного закона сопротивления совпадает с зарождением турбулентности.

В связи с изложенным различаем критические и характерные значения числа  $Re$ . Под характерными понимаем значения  $Re$ , отвечающие границам изменения закона сопротивления. Критическое же число будет всегда представлять собою критерий перехода одного режима движения в другой. Первым числам присвоен индекс  $N$ , вторым  $(Re)_{кр}$ .

Обработка наших исследований дала для границы линейного закона сопротивления следующее выражение:

$$N_1 = 600 (1 - 0,96\varepsilon^{0,4})^{1,4}. \quad (5)$$

По характеру кривых и из других соображений можно предполо-



№ п/п	Диаметр, см	Средняя скорость, м/сек	Модуль скорости, м/сек
1	0.88	0.810	0.600
2	0.19	0.657	1.072
3	0.158	0.327	1.530
4	0.268	0.205	2.44
5	0.365	0.150	3.32
6	0.491	0.120	4.51
7	0.800	0.089	7.25
8	1.017	0.074	9.25
9	0.205	0.854	0.585
10	0.255	0.687	0.728
11	0.305	0.574	0.871
12	0.405	0.432	1.155

жить, что для значений  $\varepsilon < 0,5^* N_1 = (Re)_{н.кр.}$

$$\varepsilon > 0,5^* N_1 \neq (Re)_{н.кр.}$$

Как показывает формула (5), исполненные исследования движения в шероховатых щелях заполняют существовавший до них разрыв между числом  $Re$ , отвечающим верхнему пределу применимости закона Дарси для зернистых грунтов, и  $(Re)_{н.кр.}$  для движения воды в трубах или в щелях.

Вторая граница, отделяющая переходную зону от турбулентной области, определяется значениями  $Re = N_2$ . Для исследованного типа шероховатости  $N_2$  колеблется от 450 до 1100.\*\*

В итоге проведенных нами исследований получены главные зависимости между факторами, определяющими напорное равномерное движение воды в одиночной щели. Основным результатом сводится к 1) установлению связи между коэффициентом сопротивления, числом Рейнольдса и безразмерными характеристиками шероховатости, 2) выявлению характерных и критических значений числа Рейнольдса.

Институт геологических наук

Академии Наук Арм. ССР.

Закавказский научно-исследовательский

институт водного хозяйства.

Ереван—Тбилиси, 1946, ноябрь.

Գ. Մ. ԼՈՄԻՉԵ

#### Ջրի շարժումը ձեղքերում

Աշխարհում մեզ հաղորդված են անհարթ պատեր ունեցող ձեղքերում ջրի ճնշումային շարժման տեսական և էքսպերիմենտալ ուսումնասիրության հիմնական արդյունքները: Ուսումնասիրվել է նաև ջրի շարժումը հարթ պատեր ունեցող ձեղքերում և համեմատոր միատարր դեմքում, որպես երկու սահմանային դեպքեր, որոնց ձգտում է ջրի ճնշումային շարժումը անհարթ ձեղքերում՝ հարաբերական անհարթության նվազման կամ ավելացման պարագայում:

Հիմնական արդյունքը հանգում է՝ 1. կապի սահմանմանը դիմադրության գործակցի, Ռեյնոլդսի թվի և անհարթության անչափանիշ բնութագրությունների միջև, 2. Ռեյնոլդսի թվի բնորոշ ու կրիտիկական նշանակությունների հայտարարմանը:

G. M. Lomise

#### The Movement of Water in Slits

The main results of the theoretic-experimental study of the pressure motion of water in slits with rough walls are reported in the paper. The movement of water in slits with smooth walls and in uniform grainy grounds was also studied as two limitation

\* Здесь, конечно, не может быть резкой границы.

\*\* В кратком докладе мы не имели возможности остановиться на всех найденных значениях и выражениях закона сопротивления движению, критических и характерных чисел. Результаты наших исследований издаются отдельным выпуском.

cases to which the pressure flow of water tends in roughened slits at increasing or decreasing relative roughness:

The principal result leads to:

- 1) the determination of the connection between the resistance coefficient, Reynolds number and sizeless characteristic of roughness;
- 2) the exposition of characteristic and critical data of Reynolds number.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Пэк. Трещинная тектоника и структурный анализ, 1939.
2. П. В. Бриджмен. Анализ размерностей, 1934.
3. А. П. Зегжда. Теория подобия и методика расчета гидротех. моделей, 1936.
4. Ф. Форхгеймер. Гидравлика, 1935.
5. Л. Шиллер. Движение жидкостей в трубах, 1932.
6. Б. А. Бахметев. Механика турбулентного потока, 1939.
7. Л. Г. Лойцянский. Изв. НИГ, 9, 1933.
8. Н. Н. Павловский. Гидравлика, 1928.
9. М. А. Великанов. Динамика руслового потока, 1946.
10. Г. М. Ломизе. О фильтрации в однородных зернистых грунтах, 1946.
11. Л. С. Лейбензон. Нефтепромысловая гидравлика, ч. II, 1934.
12. Н. Н. Павловский. Теория движения грунтовой воды под гидротех. сооружениями и ее основные приложения, 1922.
13. Е. А. Замарин. Движение грунтовых вод под гидротех. сооружениями, 1931.
14. С. F. Colebrook, а. С. M. White. Proc. Roy. Soc. A. 161, 367—381, 1937.
15. P. Nemenyi. Wasserkraft u. Wasserwirtschaft 29 (14), 157—159, 1934.
16. F. Schaffernak u. R. Dachler. Die Wasserwirtschaft, № 15, 1934.