

О работах Института математики АН УССР по фильтрации в помощь великим стройкам

П. Ф. Фильчаков

1. В постановлении февральского Пленума ЦК КП(б)У „О ходе строительства Каховской гидроэлектростанции и Южно-Украинского канала и мерах, обеспечивающих выполнение производственного плана в 1952 году“ с исчерпывающей полнотой подведены итоги выполненных для этих строительных работ, намечены мероприятия по обеспечению выполнения плана текущих работ и в немногих волнующих словах показано величие и значение сталинских строек коммунизма:

„Принятое по инициативе товарища Сталина историческое постановление Советского правительства „О строительстве Каховской гидроэлектростанции на реке Днепре, Южно-Украинского канала, Северо-Крымского канала и об орошении земель южных районов Украины и северных районов Крыма“ встретило единодушное одобрение всего советского народа, занятого мирным созидательным трудом на благо нашей Родины. Сбылась вековая мечта труженников сельского хозяйства нашей республики о превращении засушливых степей Юга Украины в плодороднейший край хлопка, пшеницы, высокопродуктивного мясомолочного животноводства, тонкорунного овцеводства, птицеводства, в край изобилия и общественного богатства.

Великие стройки на Волге и Днепре, Дону и Аму-Дарье являются составной частью сталинского плана преобразования природы, плана создания материально-технической базы коммунизма в нашей стране. Украинский народ, вместе со всеми народами Советского Союза, горячо благодарит большевистскую партию, Советское правительство и любимого вождя товарища Сталина за величайшую заботу о дальнейшем улучшении благосостояния и повышении культурного уровня советского народа, о дальнейшем хозяйственном и культурном расцвете Советской Украины.

Сооружение великих сталинских строек на Юге Советской Украины является еще одним ярким выражением последовательно осуществляемой ленинско-сталинской национальной политики большевистской партии, свидетельством нерушимой ленинско-сталинской дружбы народов нашей советской Родины, ярчайшим примером братской помощи украинскому народу со стороны всех народов Советского Союза и, в первую очередь, великого русского народа“¹.

¹ „Правда Украины“ № 49(3019) от 27 февраля 1952 г.

Пленум ЦК КП(б)У отметил, что в 1951 году, помимо других выполненных работ, „разработаны проектные задания на строительство Каховской ГЭС и Каховского водохранилища, проектные задания на строительство Южно-Украинского канала, ...варианты створа плотины Молочанского водохранилища и перехода Южно-Украинского канала в Крым“¹.

В обосновании этих проектных заданий непосредственное участие принимал и Институт математики АН УССР.

Вся работа по оказанию помощи великим сталинским стройкам осуществлялась, в порядке содружества, отделами механики сплошных сред (действ. член АН УССР А. Ю. Ишлинский) и дифференциальных уравнений (член-корр. АН УССР Ю. Д. Соколов) под общим руководством действ. члена АН УССР А. Ю. Ишлинского.

В рамках академии Институт математики вел свои исследования комплексно с Институтом гидрологии и гидротехники, а затем с Институтом геологических наук. Комплексное проведение работ, хотя и потребовало значительных дополнительных усилий, вполне себя оправдало, так как большие проблемные вопросы, выдвигаемые социалистическим строительством могут решаться только широким коллективом научных работников.

Конкретно в Институте математики были разработаны эффективные методы приближенного расчета фильтрации из каналов в однородном грунте (член-корр. АН УССР Ю. Д. Соколов), эффективный приближенный метод гидромеханического расчета плотин произвольного профиля в однородном грунте (канд. физ.-матем. наук П. Ф. Фильчаков), методика электро моделирования задач фильтрации (напорных и безнапорных) для произвольного геологического разреза грунта (П. Ф. Фильчаков и В. И. Панчишин) и выполнено электро моделирование всех задач фильтрации по заданию Института гидрологии и гидротехники и Института геологических наук АН УССР.

Кроме того, при участии проф. А. М. Сенкова (ВНИИГ, Ленинград) нами была проведена большая работа по проверке в натуре теоретических результатов и результатов электро моделирования.

К более подробному описанию выполненных работ мы и переходим.

2. Для того чтобы обеспечить устойчивость и долговечность проектируемого гидротехнического сооружения, необходимо принять во внимание ряд конструктивных и строительных соображений, а также со всей тщательностью исследовать напряжения, возникающие в теле сооружения и в грунте, условия пропуска руслового потока реки и режим грунтовых вод.

Исследование движения грунтовых вод в сложных геологических условиях теоретическим путем из-за непреодоленных математических трудностей в настоящее время не может быть выполнено. Поэтому для решения реальных, выдвигаемых практикой задач фильтрации широко применяется метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), разработанный акад. Н. Н. Павловским [4] еще в 1918—1920 гг.

В качестве проводящей среды акад. Н. Н. Павловский применял станиоль, что позволяло практически решать задачи фильтрации только для однородного грунта.

¹ „Правда Украины“ № 49 (3019) от 27 февраля 1952 г.

В настоящее время в качестве проводящей среды больше всего применяются водные и желеобразные (на агар-агаре) электролиты, которые позволяют моделировать задачи фильтрации в разнородном грунте, включая и пространственные задачи [1].

Однако при использовании электролитов техника экспериментов довольно сложна и, кроме того, невозможно избежать от контактной разности потенциалов, что вносит дополнительные погрешности.

Чтобы устранить эти недостатки, нами предложено [7] в качестве проводящей среды использовать электропроводную бумагу, которая в настоящее время производится в полупромышленном масштабе.

Проводимость этой бумаги электронная, поэтому контактная разность между металлическими питающими шинами и бумагой практически отсутствует. Удельное сопротивление различных сортов бумаги может изменяться в широких пределах (от десятков *ом* до десятков *мгом* на 1 см^2). Техника эксперимента на электропроводной бумаге чрезвычайно проста; помимо этого проводимость этой бумаги стабильна во времени.

При воспроизведении заданного геологического разреза грунта отдельные зоны, вырезанные из различных сортов бумаги, склеиваются при помощи специального электропроводного клея.

Наиболее эффективно применение электропроводной бумаги при моделировании безнапорных задач фильтрации, при решении которых необходимо подбором определить неизвестный участок границы области движения — кривую депрессии, — заданный функциональными условиями.

Так, например, гидродинамическая сетка движения грунтовых вод (рис. 1) для намывной земляной плотины, состоящей из семи различных зон при трехслойном водопроницаемом грунте ($k_I : k_1 = 180$, $k_{II} : k_1 = 23$; $k_{III} : k_1 = 15$; $k_{IV} : k_1 = 1,1$; $k_2 : k_1 = 28$; $k_3 : k_1 = 6,1$), была построена двумя лаборантами в течение 16 рабочих часов.

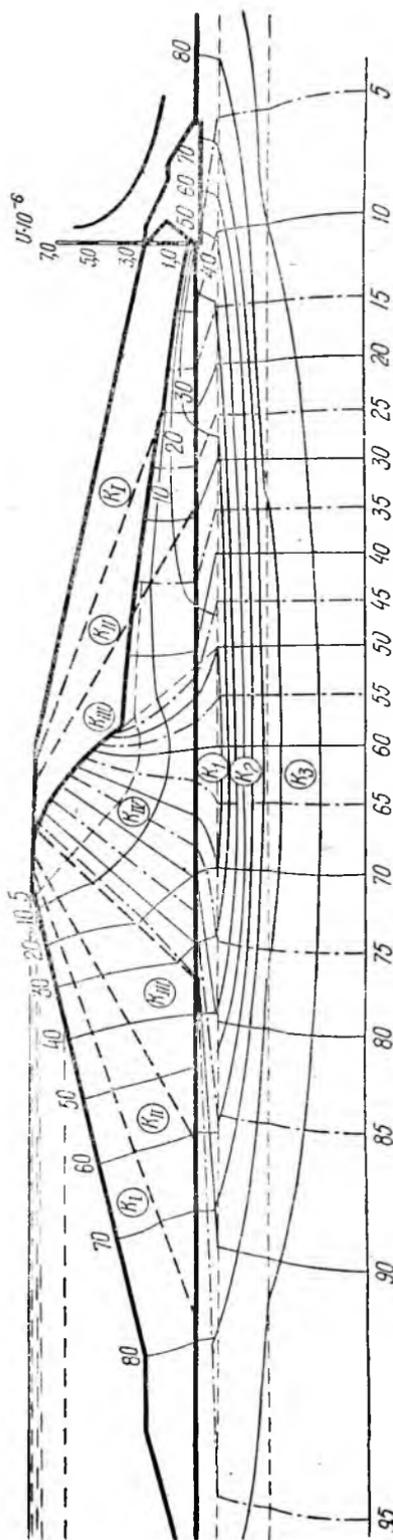


Рис. 1.

К недостаткам имеющихся образцов бумаги надо отнести ее электрическую неоднородность, которая в среднем составляет $\pm 10\%$. Однако, как показали выполненные нами экспериментальные исследования [11], точность моделирования задач фильтрации на таком локально неоднородном материале (неоднородность которого носит чисто случайный характер), благодаря усреднению по площади, приводит к погрешности порядка 1—2%.

Для решения задач фильтрации автор совместно с В. И. Панчишиным сконструировал и построил пять моделей электроинтегратора. Один из них (ЭГДА-3) с 1949 г. успешно работает в тресте „Союзводпроект“ (Москва) (рис. 2) и обслуживает сейчас великие стройки.

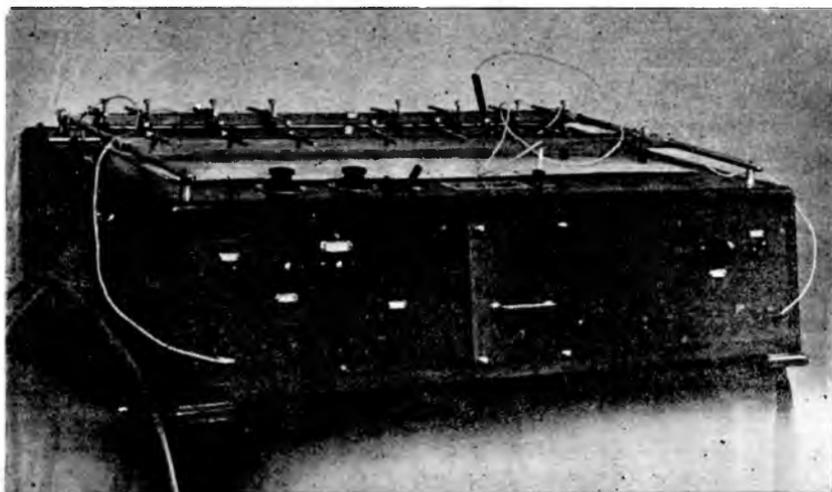


Рис. 2.

В интеграторе ЭГДА-3 в качестве электропроводной среды применен обыкновенный картон, пропитанный высокостабильными электролитами. Для уменьшения контактной разности в этом интеграторе применен ток звуковой частоты. Подробное описание прибора помещено в статье [8].

В 1950 г. нами был разработан малогабаритный интегратор ЭГДА-5, работающий на промышленной электропроводной бумаге.

Габаритные размеры прибора $22 \times 18 \times 10$ см, вес 3 кг, питающее напряжение 110—220 в. Для работы прибора требуется еще какой-либо стол для размещения листа электропроводной бумаги.

На опытном образце прибора ЭГДА-5 в 1951 г. под руководством автора было исследовано 24 различных варианта водосливной плотины Каховской ГЭС¹, 16 вариантов земляной плотины на реке Молочной, 6 вариантов флютбета гидростанции при этой плотине, 20 различных вариантов задач фильтрации из каналов в сложных геологических условиях и свыше 40 вариантов задач фильтрации в обход плеч плотины.

¹ О работе по определению рационального профиля водосливной плотины Каховской ГЭС автором был сделан доклад на выездной сессии АН УССР, состоявшейся в г. Запорожье 21—24 мая 1952 г., который будет напечатан в сборнике „Отделение технических наук Академии наук УССР великим стройкам“.

Важнейшие из указанных задач моделировались два-три раза, и в качестве окончательных результатов принимались среднеарифметические значения.

Все полученные результаты были переданы Институту гидрологии и гидротехники и Институту геологических наук, совместно с которыми эти темы прорабатывались. Впоследствии эти работы вошли как составная часть в технические отчеты, переданные институтам „Укрग्रидропроект“ и „Укргипроводхлопок“, которыми были использованы при разработке соответствующих проектных заданий.

В настоящее время автором совместно с В. И. Панчишиным сконструирован интегратор ЭГДА-6, серийное производство которого налажено в физико-технических экспериментальных мастерских Киевского государственного университета.

В настоящее время заканчивается изготовление первой серии (трех) интегралов, которые будут переданы институтам „Укргипроводхлопок“ (Киев), ВНИИГиМ (Москва) и лаборатории электро моделирования Киевского государственного университета.

Эта модель построена на базе прибора ЭГДА-5, но оформлена в виде письменного стола для того, чтобы создать максимальные удобства для оператора.

3. Точность метода ЭГДА вследствие ряда трудностей технического порядка ограничена. Поэтому результаты электро моделирования необходимо дополнительно контролировать.

Наилучшим контролем является сопоставление результатов электро моделирования с точными теоретическими решениями и с результатами натурных исследований.

Эффективные теоретические методы в настоящее время получены только для задач фильтрации в однородном грунте.

Однако необходимо подчеркнуть, что аналитические результаты благодаря своей общности имеют большое самостоятельное значение, так как однородный грунт довольно часто встречается на практике¹.

Из теоретических работ, выполненных Институтом математики АН УССР в помощь великим стройкам, на первое место должны быть поставлены работы члена-корр. АН УССР Ю. Д. Соколова [5, 6].

Ю. Д. Соколовым получено точное решение задачи фильтрации для незакольматированного канала трапециoidalного сечения для однородного водопроницаемого слоя конечной глубины ($T < \infty$) и аналогичное решение для $T = \infty$, полученное ранее проф. В. В. Ведерниковым [2].

В этих работах Ю. Д. Соколова гармонически сочетаются сложный математический аппарат с простотой окончательных приближенных результатов, доступных самому широкому кругу инженеров-проектировщиков.

Такое сочетание достигнуто вследствие проведенной оценки порядка всех рассматриваемых величин и систематического анализа погрешностей на всех этапах работы.

¹ Так, например, водопроницаемый грунт под Каховской водосливной плотной госле обычного осреднения рассматривают как однородный.

В результате Ю. Д. Соколовым был предложен эффективный метод приближенного расчета фильтрации из каналов трапециoidalного сечения, в большинстве случаев дающий достаточно точные значения искомых величин уже в первом приближении. На основе этого метода была разработана инструкция для вычислений, непосредственно использованная в работе Институтом гидрологии и гидротехники.

Как точные, так и приближенные формулы Ю. Д. Соколова были проверены электро моделированием: в табл. 1 приведены результаты В. Н. Остапенко [3], а в табл. 2 сопоставлены значения фильтрационного расхода из головного участка Южно-Украинского канала, полученные различными методами. Анализ этих таблиц показывает вполне удовлетворительное согласование теоретических результатов с результатами электро моделирования и натурных испытаний в большом гидротехническом лотке, выполненных в Институте гидрологии и гидротехники АН УССР.

Таблица 1

Размеры канала				Q			Q _{сред.}	Q _{теор.}	δQ, %	α			α _{сред.}	α _{теор.}	δα, %
T	H	B	α	I изм.	II изм.	III изм.				I изм.	II изм.	III изм.			
20	1,84	23,7	0,15	30,5	29,8	31,9	30,7	29,65	3,5	14,8	14,5	14,0	14,4	14,3	0,7
30	2,13	16,8	0,20	23,4	24,5	24,7	24,2	23,28	4,0	11,5	11,7	11,8	11,7	11,6	0,9
20	3,09	57,1	0,20	74,9	73,2	71,2	73,2	72,96	0,3	31,7	31,8	32,5	32,0	32,3	0,9

Примечание. В табл. 1 приняты следующие обозначения:

T — глубина дренирующего слоя в м,

H — глубина канала в м,

B — ширина зеркала в м,

α — угол заложения откосов канала,

Q — приведенный расход,

α — абсцисса точки пересечения кривой депрессии с верхней границей дренирующего слоя,

δQ и δα — относительные погрешности величин Q_{средн} и α_{средн}, полученных электро моделированием.

Таблица 2

Наименование расчетных формул, методов и опытных исследований	Фильтрационный расход из канала Q					
	Однородный грунт			Канал с экраном		
Приближенные формулы Ю. Д. Соколова	№ 1 0,037	№ 2 0,038	№ 3 0,038	№ 4 —	№ 5 —	№ 6 —
По методу ЭГДА	0,042	0,036	0,037	0,0055	0,0053	0,0056
По гидродинамической сетке, скорректированной опытами в лотке	0,038	0,037	0,037	0,0050	—	—
Исследования в лотке	0,034	0,035	0,038	0,0048	—	—

Кроме теории фильтрации из каналов, в Институте математики разрабатывалась также теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями (П. Ф. Фильчаков). В данном направлении получено точное решение для двухшпунтового флютбета [10] на основе гидромеханической теории акад. Н. Н. Павловского и разработана приближенная теория гидромеханического расчета плотин.

Задача о двухшпунтовом несимметричном флютбете была поставлена Н. Н. Павловским [4] более четверти века тому назад, но ряд специфических трудностей задерживал ее решение.

Вместе с тем именно несимметричный двухшпунтовый флютбет является в настоящее время наиболее распространенным в строительной практике, и, в частности, к этому типу принадлежит флютбет Каховской водосливной плотины.

Решением двухшпунтового несимметричного флютбета при конечной и бесконечной глубинах водопроницаемого слоя по сути исчерпываются все возможные случаи точного интегрирования уравнений движения грунтовых вод. Для более сложных схем подземных контуров в настоящее время нельзя указать эффективных методов решения задач движения грунтовых вод.

Поэтому основное внимание в своих исследованиях мы направили на разработку достаточно простых, но обеспечивающих необходимую для практики точность приближенных методов гидромеханического расчета плотин.

В соответствии с этим был разработан метод последовательного отображения шпунтов [9], который позволяет произвести полный гидромеханический расчет плотины, не заглубленной в грунт, при однородном грунте основания бесконечной глубины.

В настоящее время этот метод обобщен для плотин произвольного полигонального профиля (заглубленных или не заглубленных в грунт), при конечной и бесконечной глубине однородного водопроницаемого основания, т. е. для любых встречающихся на практике подземных контуров плотин при однородном водопроницаемом основании.

4. Результаты электро моделирования задач фильтрации были проверены в натуре (проф. А. М. Сенков, П. Ф. Фильчаков) на одной из больших плотин системы Сенкова, построенной на мелкозернистых песках при напоре свыше 10 м.

В процессе постройки этой плотины по рекомендации Института математики металлический шпунт ($s = 20$ м) был заменен глиняным понуром длиной $1,5s$ — случай, не имеющий прецедентов для сооружений I класса. Этому решению предшествовала тщательная проработка шпунтового и понурного вариантов, выполненная на приборе ЭГДА-5 для реальных геологических условий.

В табл. 3 даны среднеарифметические значения приведенного напора h_r (в % от H) по основному створу плотины и результаты, полученные электро моделированием, для того же створа. Схема расположения пьезометров представлена на рис. 3, а на рис. 4 приведены графики значений отметки верхнего бьефа и приведенного напора с марта по декабрь 1951 г.

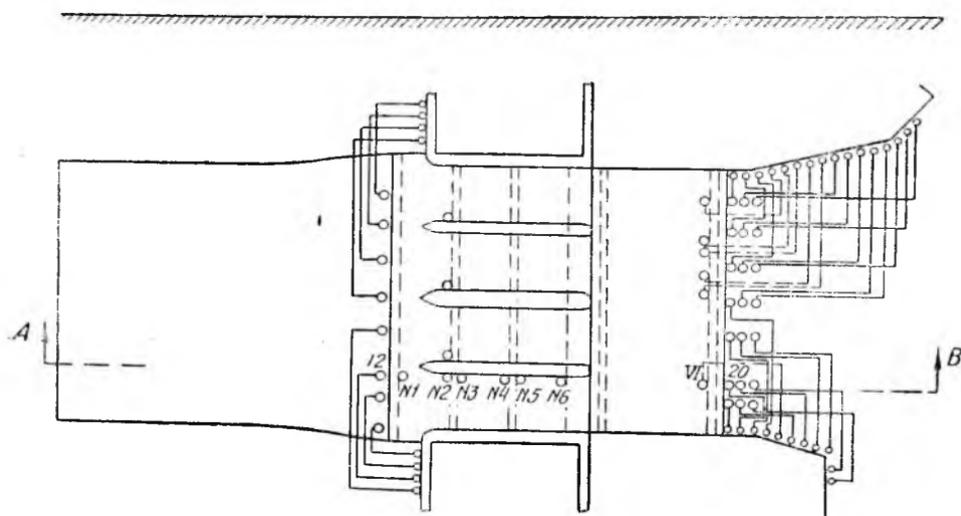
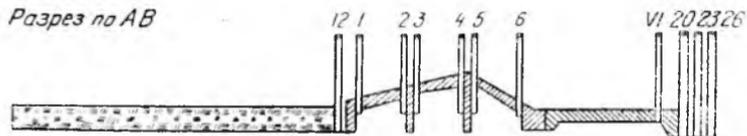


Рис 3.

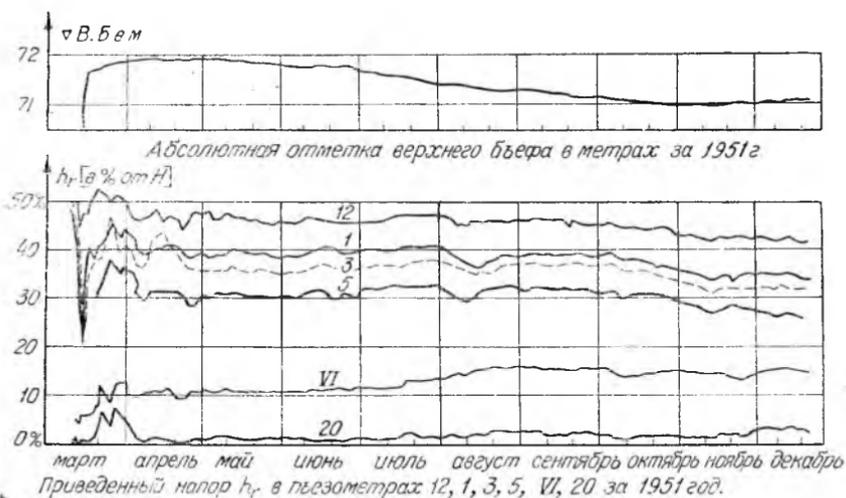


Рис 4.

Таблица 3

№ пьезометров	12	1	2	3	4	5	6	VI	20
Среднее наблюдаемое за март—декабрь 1951 г.	45,6	38,2	38,8	32,9	36,0	31,4	30,5	12,5	1,7
Результаты электромоделирования	50,8	42,6	42,0	36,2	34,9	29,2	27,4	8,5	1,2

Работа, выполненная Институтом математики по плотине Сенкова, позволила сократить сроки строительства этой плотины на полгода и сэкономить большое количество остродефицитного металлического шпунта, что было отмечено в официальных отзывах строителей и эксплуатационников.

Результаты наблюдений и накопленный опыт в решении задач фильтрации для плотины Сенкова будут использованы нами в текущем году при выполнении заданий по водосливной плотине Каховской ГЭС, на стадии технического проекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Аравин, Н. И. Дружинин, Некоторые вопросы методики экспериментальных исследований пространственной фильтрации методом ЭГДА, Изв. ВНИИГ, т. 40, 1949.
2. В. В. Ведерников, Теория фильтрации и ее применение в области ирригации и дренажа, Госстройиздат, М., 1939.
3. В. Н. Остапенко, К вопросу электро моделирования задач фильтрации из каналов трапециoidalного сечения, Укр. матем. журн., т. IV, № 1, 1952.
4. Н. Н. Павловский, Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения, Петроград, 1922.
5. Ю. Д. Соколов, О притоке грунтовых вод к дренажной канаве трапециoidalного сечения, Пр. матем. и мех., т. XV, в. 6, 1951.
6. Ю. Д. Соколов, Фильтрация без подпора из незакольматированного канала трапециoidalного сечения в однородном грунте, Укр. матем. журн., т. IV, № 1, 1952.
7. П. Ф. Фильчаков, Электро моделирование задач фильтрации в разнородном грунте, ДАН, т. 76, № 4, 1949.
8. П. Ф. Фильчаков и В. И. Панчишин, Электроинтегратор ИЕМ-3.
9. П. Ф. Фильчаков, Метод последовательного отображения шпунтов, ДАН, т. 78, № 3, 1951.
10. П. Ф. Фильчаков, Двухшпунтовый несимметричный флотбет, Гидротехническое строительство № 1, 1952.
11. П. Ф. Фильчаков, Электро моделирование задач фильтрации на электропроводной бумаге, ДАН, т. 84, № 1, 1952.

Получена 12 марта 1952 г.

Киев
