

# ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЗАКРЫТЫХ СКОРОСТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Г. МЕСАРОШ

Институт водного хозяйства и гидротехнического строительства Будапештского технического университета

(Поступило 1 ноября 1976 года)

Представлено проф. д.т.н. М. КОЗАК

Наиболее часто встречающимися оборудованьями водоочистительных установок являются скоростные фильтры. Их конструктивное выполнение в открытой форме экономично лишь до предела мощности, равной 40 000 м<sup>3</sup>/сутки, и поэтому характерными технологическими установками водоочистительных сооружений малой и средней производительности являются параллельные закрытые скоростные фильтры.

С точки зрения проектирования, эксплуатации и исследования одной из важнейших характеристик этих фильтров является гидравлическая нагрузка — так называемая скорость фильтрации. Скорость фильтрации в преобладающем числе отчетов исследований и проектных указаний считается стационарной характеристикой.

Однако это упрощающее допущение при эксплуатации параллельных закрытых фильтров выполняется сравнительно редко. Даже в случае постоянного расхода очистительной станции производительность отдельных фильтров меняется, если их промывка произведена одновременно или же нет исправного регулирования.

## **Возможность и целесообразность эксплуатации без регулирования**

В закрытых фильтрах автоматическое регулирование, обычное измерение расхода воды по каждому фильтру не применяется по экономическим причинам, а регулирование вручную или регулирование с задвижками дистанционного управления трудоемко и недостаточно надежно.

В ходе исследований нами было установлено, что можно отказаться от требований строгого поддержания данной скорости фильтрования и от внешних вмешательств во время цикла фильтрования при удовлетворении следующих условий:

- во время рабочего цикла скорость фильтрации остается всегда ниже максимума, определенного данным фильтром и сырой водой,
- при любом выбранном фильтре производительность постепенно падает

- (за исключением случая, когда после промывки остальных фильтров появляется небольшой переходный рост) во время цикла фильтрования,
- изменение времени пребывания не мешает происходящим в фильтре химическим процессам.

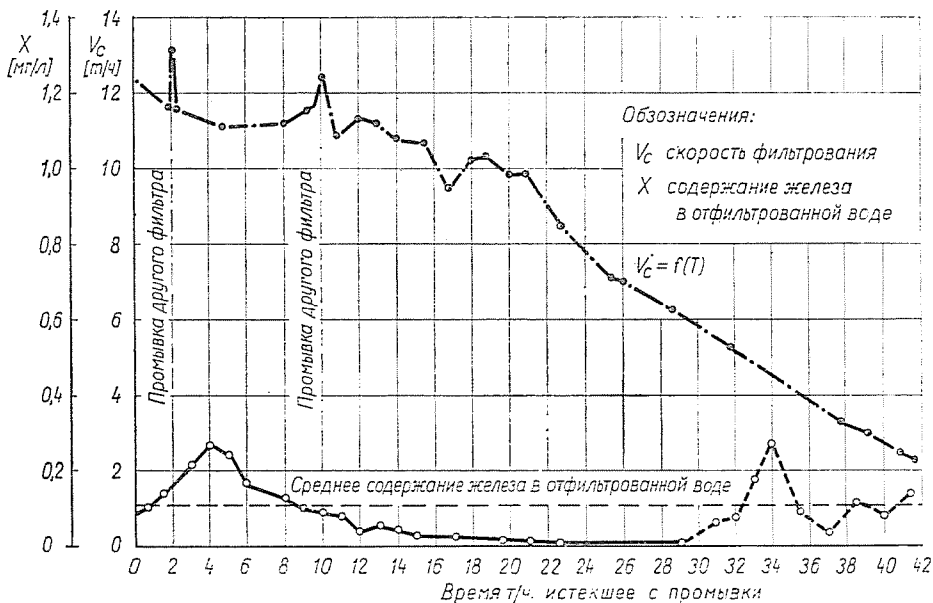


Рис. 1. Образование скорости фильтрования; 2. Обозначения; 3. Скорость фильтрования 4.  $x$  — содержание железа в отфильтрованной воде; 5. Промывка другого фильтра; 7. Среднее содержание железа в отфильтрованной воде; 8. Время т/ч, истекшее с момента промывки

Если отказаться от внешнего регулирования во время цикла фильтрования, то можно ожидать следующих преимуществ:

- отпадут затраты по индивидуальному регулированию фильтров, или расходы по автоматическому регулированию,
- качество воды повышается, если не имеет место «дергание» фильтров, которое является следствием неумелых ручных регулировок,
- поскольку нет потери напора в регулирующем устройстве, то можно ожидать экономии энергии.

Предположения были проверены с помощью фильтра, удаляющего железо в ходе серий эксплуатационных опытов. Характерные результаты измерений представлены на рис. 1., откуда видно, что слишком большая скорость фильтрования, равная 12 м/ч, падает до величины 2,5 м/ч, качество фильтрованной воды остается постоянно удовлетворительным.

На основании благоприятных результатов измерений казалось обоснованным разработать гидравлическую модель, годную для характеристики работы параллельных фильтров без регуляторов.

## Необходимость комплексной гидравлической модели

Эксплуатация без регулирования может быть проектирована лишь тогда, если есть гарантия, что фильтры будут работать удовлетворительно. По сравнению с работой на постоянной скорости, в нашем случае скорость фильтрации и потери напора фильтров при работе постоянно изменяются. Значит, задача состоит в характеристике указанных изменений, в определении факторов, показывающих связи между ними.

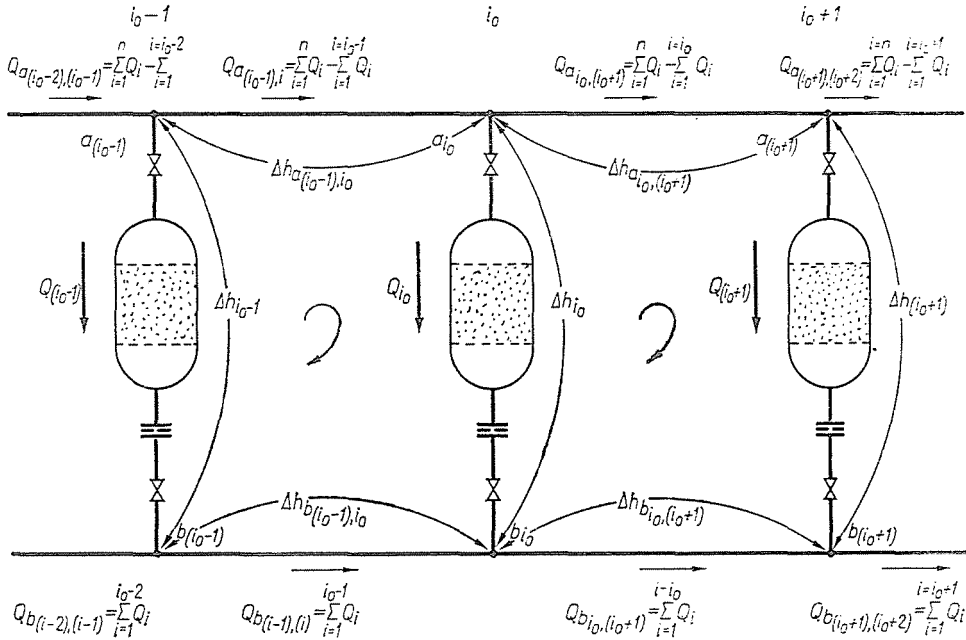


Рис. 2. Модель гидравлической системы, состоящей из параллельно соединенных фильтров

Очевидно, что на меру изменений оказывает влияние прежде всего процесс засорения, вызывающий эти изменения. Измерения при эксплуатации весьма определенно указали на два дальнейших непренебрегаемых факта: на регулиющую роль проводов, примыкающих к фильтрам, и на влияние программы промывок.

Из-за взаимодействия приведенных факторов гидравлическая система может быть исследована только на единой модели, содержащей все приведенные факторы.

### Комплексная гидравлическая модель

Опыты проводились на основании модели, представленной на рис. 2. (На рисунке показаны лишь три фильтра, но заключения действительны и для большего числа фильтров.)

С гидравлической точки зрения система представляет собой кольцевую сеть, состоящую из трубопроводов со стационарной характеристикой (расход — потери напора), из фильтрующего дрена и фильтрующего слоя. Характеристическая кривая слоя изменяется в процессе засорения.

Засорение фильтров является сравнительно медленным процессом, поэтому скорость течения в отдельных ветвях изменяется тоже медленно. Это позволяет пренебречь воздействиями, связанными с ускорениями.

Засоренность фильтрующего слоя можно принять постоянной в некоторый момент времени, как и характеристику «расход — потери напора», находящуюся в зависимости от нее. Таким образом, в определенный момент времени характеристика всех ветвей и протекающий через систему расход воды известны; значит, можно вычислить расход воды отдельных ветвей.

#### Гидравлическая характеристика элементов системы

а) Потери напора трубопроводов, арматуры, измерительных приборов можно рассчитывать известными методами гидравлики. В случае конструкций, которые встречаются в фильтрационных станциях ( $Re\ 5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$ ) члены могут быть учтены по ветвям сводно с помощью формулы  $\Delta h = CQ^2$ .

б) В водном пространстве под и над фильтрующим слоем скорость течения имеет величину порядка мм/сек; падением напора можно пренебречь. У примыкающих проводов потери на входе и на выходе можно вычислить с учетом водного пространства, находящегося в состоянии покоя.

в) Для описания потерь напора фильтрующего дна на основании результатов измерений ВИТУКИ (НИИВХ) и наших определена зависимость  $\Delta h = cv_c^2$ . В данной области, кроме этого, ( $v_c = 2 \div 15$  м/часов), хорошо применимы зависимости

$$\Delta h = cv_c^2 + kv_c = c \frac{Q^2}{F^2} + k \frac{Q}{F}, \quad (1)$$

т. е.

$$\Delta h = c'Q^2 + k'Q. \quad (1a)$$

г) Основным вопросом является образование гидравлического сопротивления собственного фильтрующего слоя. Механизм засорения до сего времени еще не известен в такой мере, чтобы с учетом всех параметров для любых технологических вариаций было возможно проводить точные расчеты.

На основании практических опытов согласно известным теоретическим результатам (Ивес, Минц и другие), возможно определить характеристическую кривую фильтра в функции количества вещества, задержанного фильтром. Количество задержанного материала определяется формулой

$$w = \int_{t=t_0}^{t=T} (x_{\text{вх}} - x_{\text{вых}}) v_c dt. \quad (2)$$

Здесь  $w$  (г/м<sup>2</sup>) — количество твердого вещества, задержанного единицей поверхности фильтра от начала цикла фильтрации;  $x_{\text{вх}}$ , т. е.  $x_{\text{вых}}$  (г/м<sup>3</sup>) — взвешенное вещество в сырой воде, т. е. в профильтрованной воде;  $v_c$  — скорость фильтрования (м/ч);  $t$  (ч) — время, истекшее от последнего промывания.

На основании результатов экспериментов, а также теоретических соображений, засорение фильтрующего слоя с хорошим приближением определяется при переменной скорости фильтрации зависимостью

$$\Delta h_{\text{слой}} = f(v_c) \Phi(w). \quad (3)$$

из которой, подставляя выражение (2) для  $w$ , получаем

$$\Delta h_{\text{слой}} = f(v_c) \Phi \int_{t=t_1}^{t=T} (x_{\text{вх}} - x_{\text{вых}}) v_c dt. \quad (3a)$$

Если скорость фильтрования не превышает значения  $15 \div 20$  м/ч, движение воды в фильтре — ламинарное течение, обычное для фильтрующих слоев скоростных фильтров. Работы Ивес, Д. Ковача, И. Хорвата [1, 9, 7] дают подробные указания и конкретные численные значения. При фильтровании диаметр свободных пор уменьшается из-за засорения, поэтому действительная скорость фильтрации растет. Принимая поры засоряющейся фильтрующей среды за трубку с постепенно суживающимся сечением, можно оценить изменение числа Рейнольдса,  $Re$ . По нашим расчетам число,  $Re$  при цикле фильтрации увеличивается, но не превосходит двойного значения его начального значения.

В случае ламинарной фильтрации (просачивания) движение воды подчиняется закону Дарси, и поэтому существует линейная связь между падением напора и скоростью фильтрации, т. е.

$$\Delta h_{\text{слой}} = v_c \frac{L}{k_D} \Phi \int_{t=t_0}^{t=T} (x_{\text{вх}} - x_{\text{вых}}) v_c dt, \quad (4)$$

где  $\Delta h$  — потери давления (м);  $L$  — толщина фильтрующего слоя,  $k_D$  — постоянная Дарси для чистого материала (м/ч).

Применив зависимость

$$v_c = \frac{Q}{F}, \quad (5)$$

получим

$$\Delta h_{\text{слой}} = \frac{Q}{F} \frac{L}{k_D} \Phi \int_{t=t_0}^{t=T} (x_{\text{вх}} - x_{\text{вых}}) v_c dt, \quad (6)$$

т. е.

$$\Delta h_{\text{слой}} = \frac{Q}{F} \frac{L}{k_D} \Phi(w). \quad (7)$$

### Система уравнений, описывающая модель

Гидравлическая модель состоит из колец, значит, по существу, применяется основная мысль метода Кросса и Лобачева, широко используемая для расчета водораспределительных сетей.

Для отдельных узлов сети условные уравнения

$$\Sigma Q = 0. \quad (8)$$

Для отдельных колец должно удовлетворяться условие

$$\Sigma h_{\text{слой}} = 0. \quad (9)$$

Применяя для фильтров с порядковыми номерами  $i - 1$  и  $i$ , а также для проводов, соединяющих их, получаем

$$Q_{a(i_0-2), (i_0-1)} - Q_{(i_0-1)} - Q_{a(i_0-1), i_0} = 0, \quad (10)$$

$$Q_{b(i_0-2), (i_0-1)} + Q_{(i_0-1)} - Q_{b(i_0-1), i_0} = 0, \quad (11)$$

$$Q_{a(i_0-i), i_0} - Q_{i_0} - Q_{a i_0, (i_0+1)} = 0', \quad (12)$$

$$Q_{b(i_0-1), i_0} + Q_{i_0} - Q_{b i_0, (i_0+1)} = 0', \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & c_{a(i_0-1), i_0} Q_{a(i_0-1), i_0}^2 + c'_{i_0} Q_{i_0}^2 + k'_{i_0} Q_{i_0} + \\ & + \frac{Q_{i_0}}{F_{i_0}} \frac{L_{i_0}}{k_{i_0}} \Phi(w_{i_0}) - c_{b(i_0-1), i_0} Q_{b(i_0-1), i_0}^2 - \\ & - c_{(i_0-1)} Q_{(i_0-1)}^2 - c_{(i_0-1)} - k'_{(i_0-1)} Q_{(i_0-1)} - \\ & - \frac{Q_{(i_0-1)}}{F_{(i_0-1)}} \frac{L_{(i_0-1)}}{k_{D(i_0-1)}} \Phi(w_{i_0-1}) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Аналитично можно записать и для других колец условные уравнения.

С математической точки зрения получится система уравнений, состоящая из интегральных уравнений Вольтера, поэтому предлагается приближенный численный метод, предполагающий применение ЭВМ для решения системы уравнений.

Основной принцип и метод нашего итеративного метода следующие:

1. В начале вычислений ( $t = t_0$ ) путем оценки принимается значение интеграла (например, после промывки  $w = 0$ ).

2. Зная начальные количества вещества  $w_i$ , в отдельных фильтрах при нашей технологии фильтрования и оформления фильтров, вычисляют для момента времени  $t_0$  величины  $\frac{L}{k_D} \Phi(w_i)$  на основании определенной функции  $\Phi(w)$ .

3. Применяя, например, итерационный метод Ньютона — Райсона определяются пропущенные отдельными фильтрами расходы.

4. Зная расход отдельных фильтров, и считая их постоянными для интервала времени  $\Delta t$ , вычисляется приращение  $w_i$  за время  $\Delta t$ .

5. К величинам  $w_i$ , добавив приращение, получаем величину  $w_i$  в момент времени  $t + \Delta t$ .

6. Проверим, не следует ли при актуальной величине  $t + \Delta t$  на основании предписанного режима работы провести промывку некоторых из фильтров. Если нужно, то для данного фильтра величина  $w_i$  сокращается до нуля и на время промывки предусматривается величина  $Q_i = 0$ . Если промывки нет, то вычисление продолжается циклически от приведенных по п. 2.

7. При вычислении беспрерывно получается расход отдельных фильтров в функции времени.

*Примечание:* Аналогично режиму действующих сооружений, конечный вид зависимости «скорость фильтрации — время» достигается лишь после нескольких циклов фильтрования. Расчет позволяет следить за этим переходным явлением, если величины  $w_i$  в начале однородно принять равными 0.

В настоящей работе не дается подробного анализа функциональной зависимости  $\Delta h = R(w)$ . Зависимости общей действительности, удобной для числового расчета, пока нет в распоряжении. Однако обращаем внимание на то, что величина  $w$  ( $\text{г/м}^2$ ) применяемая нами, находится в тесной связи с удельным оседанием ( $\sigma$ ), общепринятым в литературе по фильтрации, ибо для полного фильтрующего слоя можно записать, что

$$\sigma = \frac{\text{объем оседаний}}{\text{объем пор}} = \frac{Fw}{FLn} = \frac{w}{\rho Ln} [-] \quad (15)$$

где  $\rho$  — плотность отфильтрованного вещества ( $\text{г/м}^3$ ),  $\alpha$  — толщина слоя (м) и  $n$  — объем пор чистого фильтра.

Не берется, однако, во внимание распределение  $\sigma$ , — записанная зависимость дает среднюю величину, — поэтому предлагается эмпирическое определение зависимости  $\Delta h = \Phi(w)$ . Поскольку распределение в фильтрующем слое известно, то аналогично могут быть использованы формулы и установления специальной литературы, например результаты Ивеса.

### Применение вычислений и возможности их упрощения

Наша модель, т. е. метод расчета, позволяет решить следующие задачи: — определение изменений, необходимых для достижения более равномерной нагрузки фильтров уже работающей станции (например, постоянное дросселирование в фильтрующей трубе),

— проверку проектов фильтровочных станций без регуляторов с гидравлической точки зрения.

В специальных случаях трудоемкость расчетных работ может быть сокращена следующими упрощающими допущениями:

— можно пренебречь потерями напора, возникающими в проводах, распределяющих исходную воду, и сборных трубопроводах отфильтрованной воды, если они оставляют лишь несколько процентов от потерь напора ветвей, содержащих фильтры,

— в случае большого числа фильтров, промываемых в правильных периодах, разность давлений проводов исходной и отфильтрованной воды можно принять постоянной. В таком случае расчет сводится к решению всего только одного интегрального уравнения.

### Применяемые обозначения

$Q$	— расход ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ),
$\Delta h; h_i$	— потери напора (м в. ст.),
$c, c'$	— коэффициент потерь напора ( $\text{м}^5 \text{ч}^{-2}$ ),
$V_c$	— скорость фильтрования ( $\text{м}/\text{ч}$ ),
$k_1, k_0$	— число потерь напора ( $\text{ч}^{-1}$ ),
$k_D$	— коэффициент фильтрации по Дарси ( $\text{м} \text{ч}^{-1}$ ),
$f, \Phi$	— обозначение функциональной зависимости,
$x$	— вещество, фильтруемое в воде ( $\text{г}/\text{м}^3$ ),
$F$	— фильтрующая поверхность ( $\text{м}^2$ ),
$w$	— отфильтрованное единицей поверхности фильтра количество вещества ( $\text{г} \text{м}^{-2}$ ).

### Резюме

Опыт работающих очистительных сооружений показал, что целесообразно эксплуатировать параллельно и без отдельного регулирования закрытые скоростные фильтры. На основании результатов измерений подтвердилось, что трубопроводы, объединяющие фильтры в систему, играют важную роль. Была составлена комплексная гидравлическая модель параллельно работающих закрытых скоростных фильтров, которая охватывает



процесс засорения и режим работы фильтров. Предлагается численный метод решения системы уравнений, состоящей частью из интегральных уравнений типа Вольтера. Обращаем внимание на то, что сложные вычисления могут быть в специальных случаях в значительной мере упрощены.

### Литература

1. Ives, K. I.: Theory of filtration I. W. S. A. Spec. Subject No. 7. Vienna, 1969.
2. Mintz, D. M.: Modern theory of filtration. Seventh Congress I. W. S. A. 1966, Barcelona.
3. Козак, М.: Гидравлика I—II,\* Будапешт, 1972
4. Эляеш, Г., Боршош, И.: Водоснабжение, канализация I.\* 1969. Изд. Учебн. Будапешт, ПУБ. Рукопись
5. Месарош, Г.: Проверка системы технологии водочистки ниредьхазского гидрологического сооружения.\* Рукопись Будапешт, 1975.
6. Технология воды.\* Изд. МГТ. 1974. Будапешт
7. Хорват, И.: Фильтрация в технологии воды и сточных вод.\* Рукопись. Будапешт, 1972
8. TREANOR, A. I.: Filtration through deep beds. Process Biochemistry. 1971. sept.
9. Ковач, Дь.: Гидравлика просачивания.\* Изд. ВАН. Будапешт, 1972.
10. Аюкаев, Р. И., Стелков, А. К., Шишкин, М. Е.: Водоснабжение и санитарная техника, 1975, № 12.
11. O'MELLA, C. R., STUMM, W.: Theory of Water Filtration JAWWA vol. 59. (1967). No. 11.
12. Херейт, Ф.: Математическая модель для расчета фильтрующих циклов фильтров быстрого действия. «Водное хозяйство» «В», 1973, № 8
13. Kuo-YING-HSIUNG: Determining specific deposit by backwash technique. Proc. ASCE EE vol. 100 (1974), No. 2 (Apr).
14. JOHNSON, R. L., CLEASBY J. L.: Effect of filtration rate changes on quality. Proc. ASCE SA, vol. 95 (1966), No. 2. (febr.)
15. Дев, А. К.: Theory of sand filtration. Proc. ASCE SA vol. 95. (1966), No. 3.

Dr. Gábor MÉSZÁROS. H-1521, Budapest

\* На венгерском языке