

УДК 66.067:65.018.2

А. А. Гриченко (доцент)

УРАВНЕНИЯ ФИЛЬТРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРИ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

Существующие уравнения фильтрации при постоянной скорости [1] принципиально точно описывают этот процесс в случае несжимаемых осадков или когда сопротивлением

фильтровальной перегородки $R_{ф.п}$ можно пренебречь, так как эти уравнения не учитывают перераспределения общей разности давлений на фильтре Δp между осадком и перегородкой.

Приведем основные уравнения фильтрации для рассматриваемого процесса с учетом перераспределения общей разности давлений между осадком и перегородкой.

Для процесса фильтрации с образованием сжимаемого осадка при $R_{ф.п} = \text{const}$, если учет сжимаемости осадка проводить по уравнению $r_o = r_o' (\Delta p_{ос})^s$, с использованием очевидных соотношений $\Delta p = \Delta p_{ос} + \Delta p_{ф.п}$

и $\Delta p_{ф.п} = \mu R_{ф.п} \cdot W$ из основного уравнения фильтрации получим

$$\Delta p = \mu r_o' (\Delta p_{ос})^s x_o W q + \mu R_{ф.п} W \quad (1)$$

или

$$\Delta p = (Bq)^{\frac{1}{1-s}} + \Delta p_{ф.п}$$

Связь между q и Δp устанавливается соотношением

$$q = \frac{(\Delta p - \Delta p_{ф.п})^{1-s}}{B} = \frac{\Delta p - aW}{Wb(1 - \frac{a}{\Delta p}W)^s}, \quad (2)$$

где $B = \mu r_o' x_o W$, $b = \mu r_o' (\Delta p)^s x_o$, $a = \mu R_{ф.п}$; r_o - удельное объемное сопротивление осадка $1/\text{м}^2$; r_o' - коэффициент пропорциональности; s - показатель сжимаемости осадка; $\Delta p_{ос}$ - разность давлений на осадке, $\text{Н}/\text{м}^2$; $\Delta p_{ф.п}$ - разность давлений на фильтровальной перегородке, $\text{Н}/\text{м}^2$; μ - коэффициент динамической вязкости фильтрата, $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$; x_o - отношение объемов осадка и фильтрата; q - объем фильтрата, получаемый с единицы площади поверхности фильтрации, $\text{м}^3/\text{м}^2$ или м .

Уравнение фильтрации при $W = \text{const}$, когда учет сжимаемости осадка проводится по уравнению $r_o = r_o' (\Delta p)^s$, т.е. принимается, что осадок сжимается под действием общей разности давлений на фильтре [1].

$$\Delta p = \mu r'_0 (\Delta p)^s x_0 W q + \Delta p_{ф.п} \quad (3)$$

Необходимо учесть, что численные значения величин r'_0 и s , входящих в уравнения (1) - (3), различны и определяются при обработке опытных данных по соответствующим уравнениям.

Формулы (1) - (3) не изменяются, если вместо $x \cdot r'_0$ использовать $x_B \cdot r'_B$, где x_B - отношение веса твердых частиц осадка к объему фильтрата, а r'_B - весовое удельное сопротивление осадка.

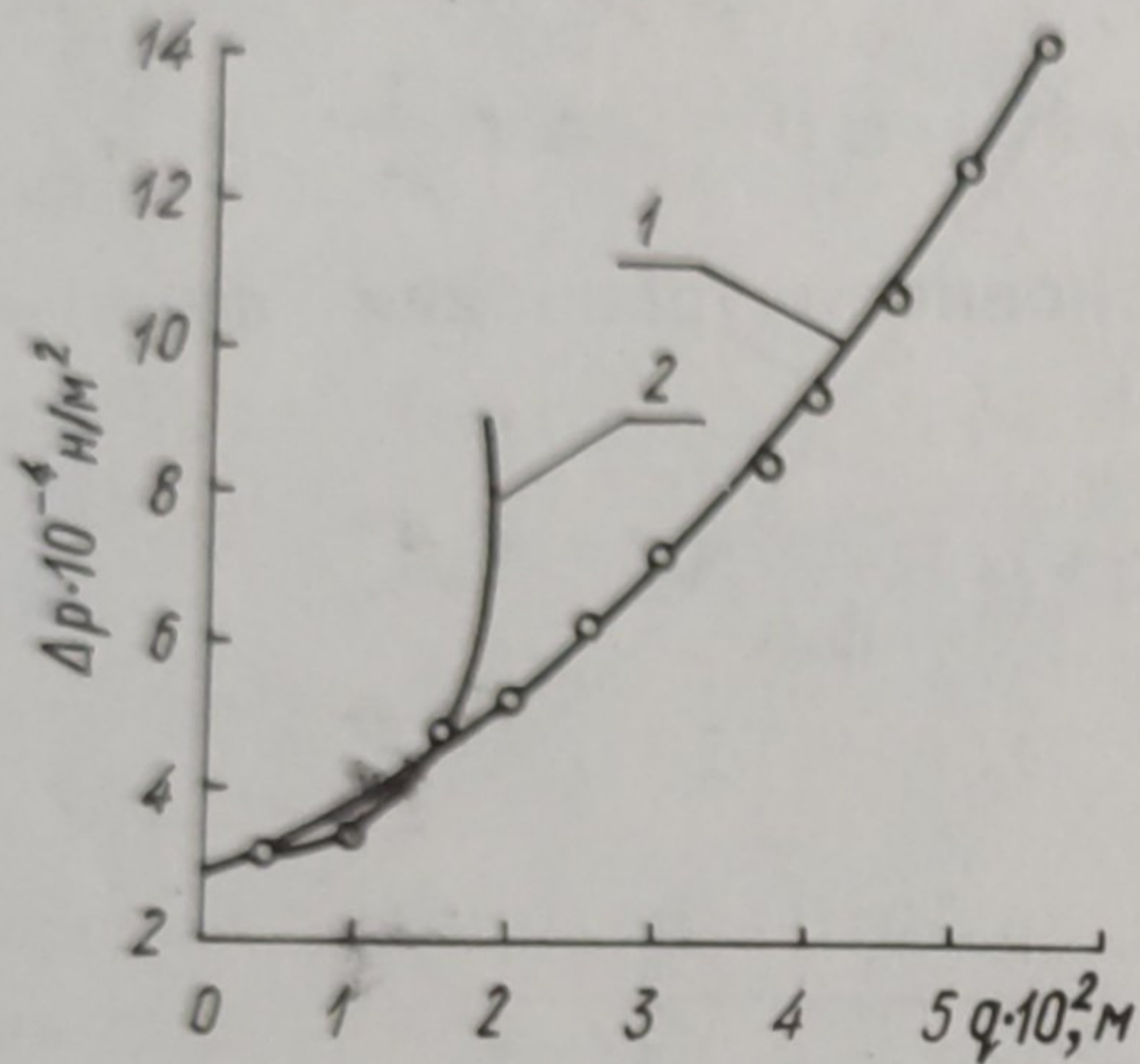


Рис. 1. Зависимость Δp от q :
 о — опытные точки; 1 — расчет по уравнению (1); 2 — расчет по уравнению (3).

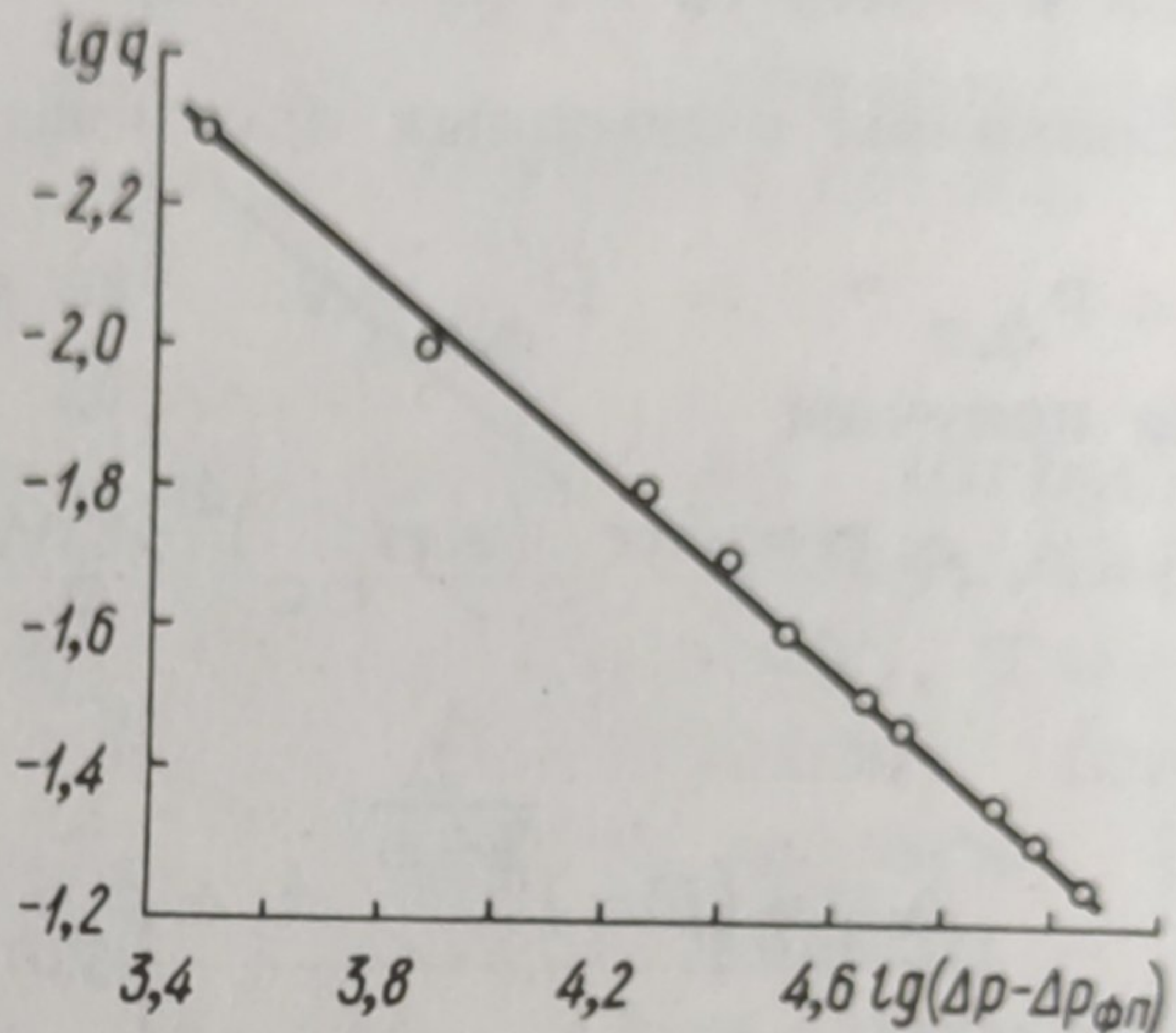


Рис. 2. К определению постоянных фильтрации r'_0 и s , используемых в уравнениях (1) и (2).

При расчете процесса фильтрации по уравнениям, учитывающим перераспределение давлений, постоянные фильтрации r'_0 и s могут быть определены с использованием уравнения (2), которое после логарифмирования имеет вид

$$\lg q = -\lg B + (1-s)\lg(\Delta p - \Delta p_{ф.п}) \quad (4)$$

Уравнение (4) при $s = \text{const}$ в координатах $\lg q - \lg(\Delta p - \Delta p_{ф.п})$ представляют собой прямую линию. Имея экспериментальные данные $q = f(\Delta p)$ и построив график в координатах $\lg q - \lg(\Delta p - \Delta p_{ф.п})$, легко определить r'_0 и s .

Если перераспределение давлений не учитывается, то расчет процесса должен проводиться по уравнению (3), а обработка экспериментальных данных с использованием уравнения

$$\lg A = \lg r'_0 + s \lg \Delta p, \quad (5)$$

$$\text{где } A = \frac{\Delta p - \Delta p_{\text{ф.п}}}{\mu x_0 W q}$$

Уравнение (5) при $s = \text{const}$ также представляет собой уравнение прямой в координатах $\lg A - \lg \Delta p$. Сравним эти два метода обработки экспериментальных данных и расчета процесса фильтрования при $W = \text{const}$.

Экспериментальные точки при проведении опыта по разделению на фильтре водной суспензии карбоната магния при $W = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м/с, $\mu = 0,9 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м², $x_0 = 0,013$ показаны на рис. 1 [2]. Определено, что $R_{\text{ф.п}} = 0,62 \cdot 10^{11}$ 1/м, а значит, $\Delta p_{\text{ф.п}} = 2,79 \cdot 10^4$ Н/м².

На рис. 2 показано, что экспериментальные точки вполне удовлетворительно интерполируются прямой в координатах

$\lg q - \lg (\Delta p - \Delta p_{\text{ф.п}})$. Обработкой данных, приведенных на рис. 2, получено, что $r'_0 = 6,92 \cdot 10^{12}$ 1/м² и $s = 0,337$.

Тот факт, что опытные точки располагаются на прямой удовлетворительно, обеспечивает хорошее совпадение экспериментальных данных и расчетных по уравнению (2) (кривая 1 на рис. 1). Отклонения расчетных и экспериментальных значений во всем диапазоне не превышают 3%.

На рис. 3 представлены результаты обработки экспериментальных данных в координатах $\lg A - \lg \Delta p$.

Из рисунка видно, что опытные данные не могут быть в исследованном диапазоне интерполированы с достаточной степенью точности прямой. Значит, в этом случае, как это видно из уравнения (5), не выполняется условие $s = \text{const}$, что объясняется погрешностью метода.

Точность расчета в этом случае можно повысить, если интерполировать опытные данные на различных участках различными прямыми, например прямыми 1 и 2 на рис. 3. Этим прямым соответствуют свои определенные значения r'_0 и s . Несмотря на большую трудоемкость, в этом случае расчет процесса с достаточной точностью по уравнению (3) может быть проведен только на этих отдельных участках. Так, расчет $q = f(\Delta p)$ при значениях r'_0 и s , определенных с использованием прямой 1 (рис. 3), обеспечивает необходимую точность только в диапазоне $\Delta p = (2,7 - 4,5) \cdot 10^4$ н/м². При больших значениях Δp отклонение расчетных данных от экспериментальных резко возрастает (рис. 1, кривая 2). Использование

r'_0 и s , определенных в соответствии с уравнением прямой 2 (рис. 3), обеспечивает необходимую точность расчета при больших значениях Δp , в то же время погрешность расчета процесса при малых значениях Δp высока (более 20%).

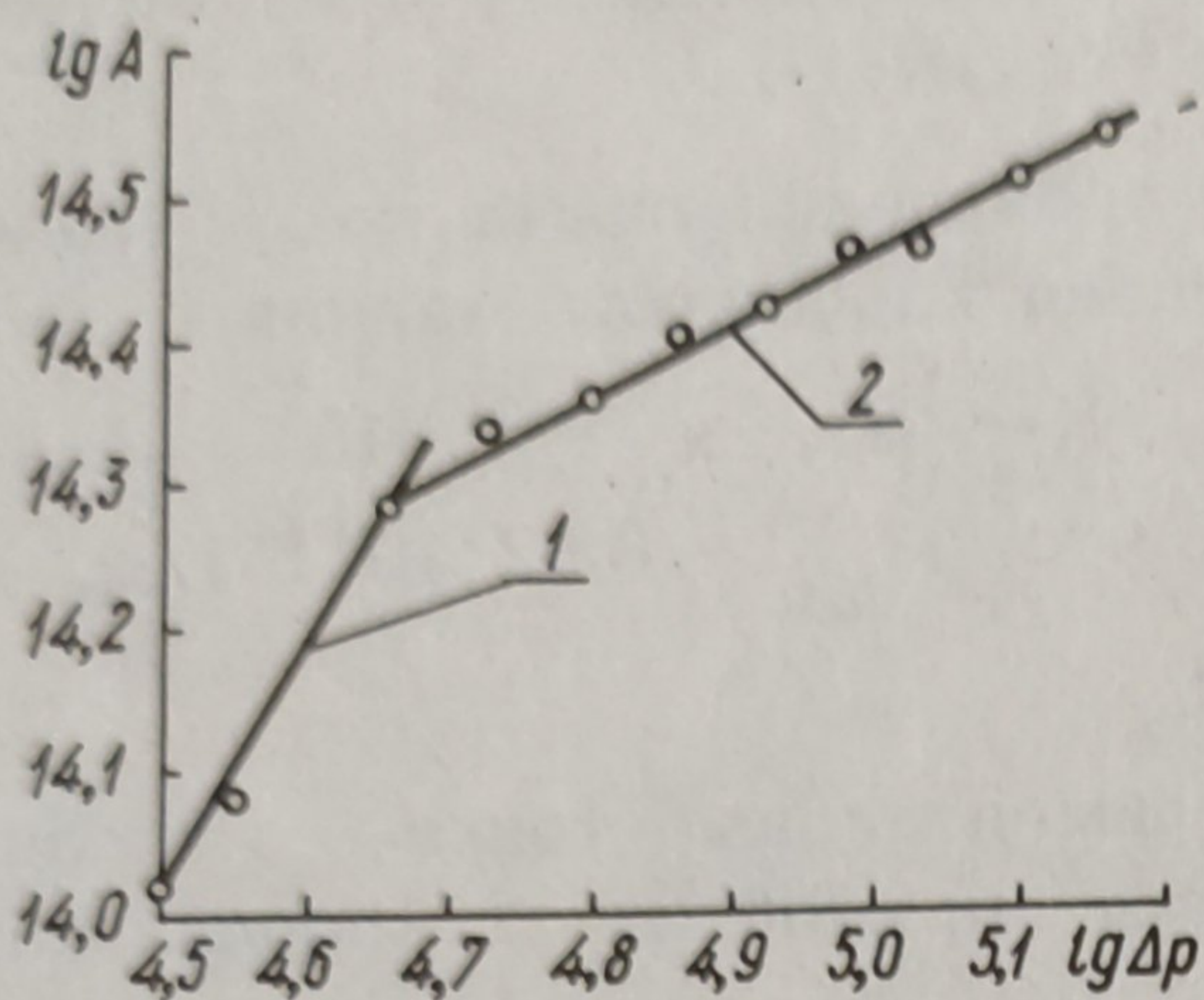


Рис. 3. К определению постоянных фильтрации r'_0 и s , используемых в уравнении (3).

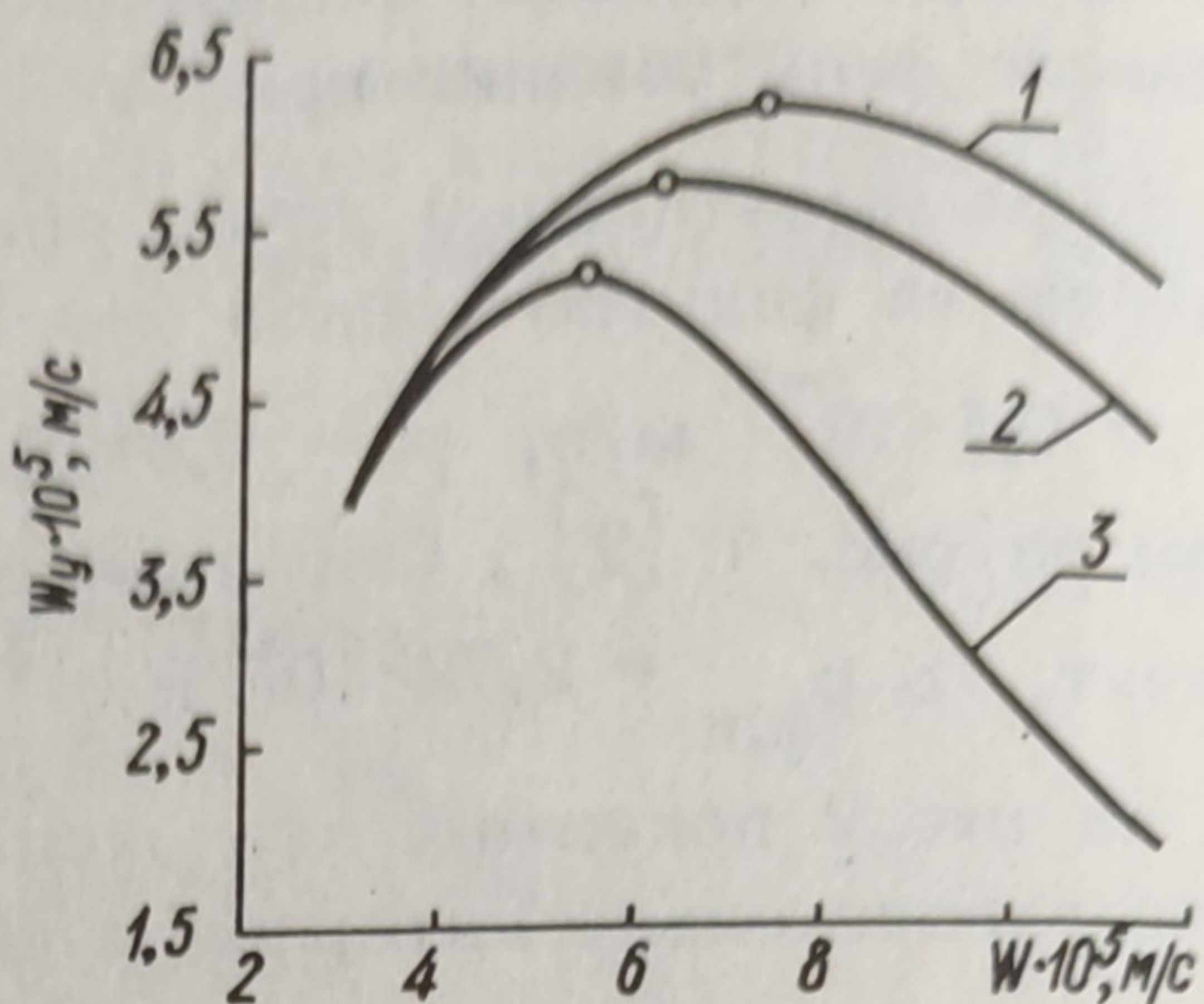


Рис. 4. Зависимость условной средней скорости процесса от величин W и $R_{ф.п}$:
 1 — $R_{ф.п} = 0$; 2 — $R_{ф.п} = 10 \cdot 10^{10}$; 3 — $R_{ф.п} = 30 \cdot 10^{10}$

Таким образом, по данным анализа уравнения фильтрации с учетом перераспределения общей разности давлений на фильтре между перегородкой и осадком принципиально более верны, так как учитывают, что осадок сжимается под действием только части общей разности давлений и обеспечивают более высокую точность расчета. Очень важно, что эти решения обладают более широкими экстраполяционными возможностями и позволяют обойтись меньшим объемом опытных данных.

Очевидно, расхождение по обоим рассматриваемым методам тем ниже, чем меньше доля сопротивления фильтровальной перегородки в общем сопротивлении фильтрованию и чем менее сжимаем осадок. Если можно принять $R_{ф.п} = 0$ или $s = 0$, то оба метода совпадают.

Для случая, когда расчет процесса должен вестись по формулам (1) и (2), рассмотрим определение оптимальной скорости процесса, обеспечивающей максимум производительности фильтра за цикл, включающий время фильтрования τ , промывки осадка $\tau_{п}$ и вспомогательных операций $\tau_{в}$.

В литературе имеются формулы для определения $W_{опт}$ в некоторых частных случаях. В работе [1] приведена зависимость для определения $W_{опт}$ для несжимающих осадков при отсутствии в цикле операций промывки.

Наиболее общий случай рассмотрен в работе [3]. Однако во всех этих работах не было учтено перераспределения общей разности давлений между осадком и перегородкой. Поэтому представляется целесообразным получить соответствующие расчетные зависимости и определить условия их использования.

Значение $W_{\text{опт}}$ найдем из условия максимума средней скорости за время $\tau_{\text{раб}}$ рабочего цикла

$$W_{\text{ц}} = \frac{q}{\tau + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{в}}} \quad (6)$$

Продолжительность вспомогательных операций принимается не зависящей от толщины слоя осадка. Время фильтрования определяется очевидным равенством $\tau = \frac{q}{W}$. Длительность находили с помощью опытного значения расхода промывной жидкости на 1 м³ влажного осадка $v_{\text{п}}$ [4]. Расход промывной жидкости, приходящейся на 1 м² поверхности фильтрования, определяется по формуле

$$V_{\text{п}} = v_{\text{п}} \times q \quad .$$

Используя отношения средней вязкости промывного фильтра к вязкости жидкой фазы суспензии $\mu_{\text{п}} / \mu = M$, разности давлений при промывке к разности давлений при фильтровании $\Delta p_{\text{п}} / \Delta p = P$, скорость промывки можно определить по формуле

$$W_{\text{п}} = W \frac{P}{M} \quad (7)$$

Для сжимаемых осадков это соотношение справедливо при $\Delta p_{\text{п}} < \Delta p$. Для рамного пресс-филтра в (7) легко могут быть внесены необходимые коррективы. Время промывки определим по формуле

$$\tau_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{W_{\text{п}}} = C \frac{q}{W} \quad ,$$

где $C = v_{\text{п}} \times \frac{M}{P}$ — постоянная величина.

Подставив значения q , τ и $\tau_{\text{п}}$ в соотношение (6), про- дифференцировав W по W и приравняв первую производ- ную к нулю, после преобразований получим

$$b W_{\text{опт}}^2 \tau_v (1 + W_{\text{опт}} s) \left(1 - \frac{a W_{\text{опт}}}{\Delta p}\right)^s = (1 + C)(\Delta p - a W_{\text{опт}}) \quad (8)$$

Определение $W_{\text{опт}}$ по формуле (8) возможно графическим методом или методом последовательных приближений. В уравнении (8) Δp необходимо рассматривать как заданную величину предельно допустимой разности давлений на фильтре. Рассмотрим некоторые частные случаи. Если осадок несжимаемый ($s = 0$), то из уравнения (8) после преобразований получим [3]:

$$W_{\text{опт}} = \frac{\Delta p}{a + \sqrt{\frac{b \Delta p \tau_v}{1 + C}}} \quad (9)$$

Для определения условий, при которых необходимо учитывать перераспределение общей разности давлений между осадком и перегородкой, проведен расчетный анализ с привлечением характерных для практики количественных данных: $r'_0 = 10^{11}$; $s = 0,5$; $x_0 = 0,333$; $\Delta p = 9 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$. В расчетах переменными принимаются величины $R_{\text{ф.п}}$ и W .

Результаты расчетов по определению $W_{\text{опт}}$ приведены на рис. 4.

Данное исследование показывает, что учет перераспределения давлений необходим, когда величины Δp и $\Delta p_{\text{ф.п}}$ соизмеримы. Максимальная погрешность расчета при использовании уравнений, не учитывающих этого эффекта, будет иметь место, в том случае, когда сопротивление фильтрующей перегородки равно сопротивлению слоя осадка в конце процесса фильтрования.

Если $\Delta p / \Delta p_{\text{ф.п}} \geq 10$, а это наиболее часто реализуется на практике, то учет перераспределения давлений незначительно повышает точность расчета. В этом случае возможно использование наиболее общих расчетных зависимостей, приведенных в работе [3].

В ы в о д

Учет перераспределения общей разности давлений между осадком и фильтровальной перегородкой позволяет более точно описать процесс фильтрования при постоянной скорости.

Л и т е р а т у р а

1. Жужиков В.А. Фильтрование. М., 1968.
2. McCabe W.L., Smith J.C. Unit operations of chemical engineering. New York, Toronto, London, 1956.
3. Гриченко А.А. О расчете наибольшей производительности фильтров периодического действия при постоянной скорости процесса. - В сб.: Химия и химическая технология, вып. 9, Минск, 1974, с. 155.
4. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. М., 1967.