

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОКРАЩЕНИЯ СТОКА В РАЗВЕТВЛЕННОЙ СИСТЕМЕ ВОДОТОКОВ

Оценка влияния отбора подземных вод на водный режим окружающих территорий (в частности, малых рек) является важным этапом проектирования различных водохозяйственных объектов. Распределение сокращения стока между участками разветвленной системы водотоков определяется их размерами и взаиморасположением, параметрами гидравлической связи эксплуатируемого горизонта с водотоками, относительным расположением водозаборных сооружений, гидрогеологическими условиями. Дифференцированный подход к каждому участку позволяет оценить последствия подземного водоотбора.

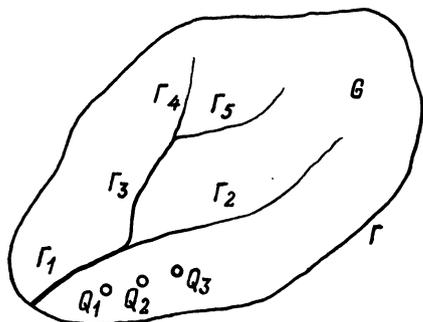
Аналитические методы расчета разработаны для совершенных водотоков простейшей конфигурации (прямолинейной и угловой) в однородном пласте [1].

Моделирование позволяет полнее использовать гидрогеологическую и гидрологическую информацию для оценки распределения сокращения стока [2].

Применение ЭВМ обеспечивает требуемую точность и оперативность многовариантных расчетов в широких диапазонах гидрогеологических параметров. Традиционные методы [2] определения сокращения стока, используемые при оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод на АВМ, являются более трудоемкими.

Численный расчет сокращения стока выполняется следующим образом. Пусть пласт  $G$  ограничен контуром  $\Gamma$  (рис. 1). В области  $G$  расположен водоток, контур которого состоит из участков  $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots$ . Тогда понижения напора  $s(x, y, t)$  в водоносном горизонте (с водопроницаемостью  $T(x, y)$  и водоотдачей  $\mu(x, y)$  под влиянием  $N$  скважин с дебитами  $Q_n$ , расположенных в точках  $(x_n, y_n)$ , где  $n = \overline{1, N}$  рассчитываются из уравнения [3]

$$\mu \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial s}{\partial y} \right) + p + \sum_{n=1}^N Q_n \delta(x-x_n) \delta(y-y_n), \quad (1)$$



где  $\delta(x)$  — дельта-функция. Член  $p$  характеризует перетекание из реки в водоносный горизонт при отборе подземных вод и соответствует "внутренним" граничным условиям III рода.

Рис. 1. Схема разветвленной системы водотоков.

Рассмотрим член  $p$  для отдельного участка водотока  $\Gamma_1$ . Напор в пласте под контуром водотока сохраняет непрерывность:  $s|_{\text{л}} = s|_{\text{п}}$ ;  $(x, y) \in \Gamma_1$ . Значки "л" и "п" показывают, что напор берется слева и справа от контура водотока, соответственно. Расход подземных вод изменяется при переходе через линию контура водотока; разница погонных расходов фильтрационного потока с различных его сторон равна фильтрационным потерям на единицу длины русла:

$$T \frac{\partial s}{\partial n_1} \Big|_{\text{л}} - T \frac{\partial s}{\partial n_1} \Big|_{\text{п}} = \frac{T}{L_1} (s - S_1); (x, y) \in \Gamma_1,$$

где  $S_1$  – понижение уровня воды в водотоке под влиянием отбора подземных вод;  $L_1$  – эквивалентная длина пути фильтрации для данного участка водотока [2];  $\partial s / \partial n_1$  – производная понижения по нормали к контуру водотока.

Если под влиянием водоотбора напор в пласте опускается ниже кровли горизонта под каким-либо участком водотока  $\Gamma_1'$  (т.е. понижение превышает величину  $s_{\text{д}}$ ), то вода в пласт здесь поступает "дождеванием" [2]:

$$T \frac{\partial s}{\partial n_1} \Big|_{\text{л}} - T \frac{\partial s}{\partial n_1} \Big|_{\text{п}} = \frac{T}{L_1} (s_{\text{д}} - S_1); (x, y) \in \Gamma_1'.$$

Пусть контур участка водотока  $\Gamma_1$  описывается уравнением

$$\varphi_1(x, y) = 0, (x, y) \in \Gamma_1.$$

Тогда для члена  $p$  в уравнении (1) с помощью теории обобщенных функции получаем выражение [4]:

$$p = \begin{cases} g(S_1 - s), & s < s_{\text{д}}; \\ g(S_1 - s_{\text{д}}), & s \geq s_{\text{д}}; \end{cases}$$

$$g = \frac{T}{L_1} \delta(\varphi_1(x, y)) |\text{grad } \varphi_1|; |\text{grad } \varphi_1| = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial y}\right)^2}.$$

Заметим, что для численного расчета не требуется знания конкретного вида уравнения  $\varphi_1$ .

На различных участках границы  $\Gamma$  ставятся краевые условия I, II и III рода:

$$s = 0; T \frac{\partial s}{\partial n} = 0; T \frac{\partial s}{\partial n} + as = 0; (x, y) \in \Gamma, \quad (2)$$

которые однородны ввиду того что задача решается в понижениях, а не в напорах. По этой же причине имеет место простое начальное условие

$$s(x, y, 0) = 0; (x, y) \in G. \quad (3)$$

Решение задач (1)–(3) позволяет дать прогноз понижений на требуемый период времени.

В этом случае сокращение стока по участку  $\Gamma_1$  определяется формулой

$$Q_1^c = \int_{\Gamma_1'} \frac{T}{L_1} (s_{\text{д}} - S_1) dl + \int_{\Gamma_1''} \frac{T}{L_1} (s - S_1) dl,$$

где интегрирование выполняется по контуру водотока  $\Gamma_1$ ;  $\Gamma_1'$  — участок водотока  $\Gamma_1$  с "дождеванием";  $\Gamma_1''$  — участок без дождевания. Аналогичные формулы используются для расчета сокращения стока каждого участка.

Если отбор подземных вод не влияет на урочный режим водотока  $\Gamma_1$ , то во всех формулах полагаем  $S_1 = 0$ . Если же влияние отбора подземных вод значительно, изменение уровней водотока под воздействием сокращения стока выполняется с помощью кривой расходов участка или уравнений русловой гидравлики [3].

Рассмотрим особенности методики численного решения задач (1)–(3) для расчета распределения сокращения стока по участкам.

Неравномерная сетка с координатами узлов  $(x_i, y_k)$  для численного решения задачи строится так, чтобы контур водотока пересекал ее линии в узлах сетки:

$$\begin{aligned} x_{i \pm \frac{1}{2}} &= \frac{1}{2}(x_i + x_{i+1}); & y_{k \pm \frac{1}{2}} &= \frac{1}{2}(y_k + y_{k+1}); \\ h_i &= x_i - x_{i-1}; & l_k &= y_k - y_{k-1}; \\ \bar{h}_i &= \frac{1}{2}(h_i + h_{i+1}); & \bar{l}_k &= \frac{1}{2}(l_k + l_{k+1}). \end{aligned}$$

Шаг по времени  $\tau$  постоянный:  $t_j = j\tau$ ;  $j = 0, 1, \dots$  Остальные требования к сетке стандартны (сгущение сетки в области неоднородности коэффициентов, каждая  $n$ -я скважина помещается в узел сетки  $i_n, k_n$  и др.) [3].

Разностная аппроксимация для уравнений (1) имеет вид

$$\begin{aligned} \mu_{ik} \frac{s_{ik}^{j+1} - s_{ik}^j}{\tau} &= \frac{1}{\bar{h}_i} \left[ T_{i+\frac{1}{2}, k} \frac{s_{i+1, k}^{j+1} - s_{ik}^{j+1}}{h_{i+1}} - \right. \\ &- T_{i-\frac{1}{2}, k} \frac{s_{ik}^{j+1} - s_{i-1, k}^{j+1}}{h_i} \left. \right] + \frac{1}{\bar{l}_k} \left[ T_{i, k+\frac{1}{2}} \frac{s_{i, k+1}^{j+1} - s_{ik}^{j+1}}{l_{k+1}} - \right. \\ &- T_{i, k-\frac{1}{2}} \frac{s_{ik}^{j+1} - s_{i, k-1}^{j+1}}{l_k} \left. \right] + p_{ik} + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{\bar{h}_n \bar{l}_n} \delta_{i, i_n} \delta_{k, k_n}. \end{aligned}$$

Здесь  $s_{ik}^j = s(x_i, y_k, t_j)$ , остальные индексные обозначения аналогичны. Величина  $\delta_{i, i_n}$  равна единице при  $i = i_n$  и нулю — в остальных случаях.

Член  $p_{ik} = 0$  в узле  $(x_i, y_k)$ , если через него не проходит водоток. Если же через узел проходит контур водотока, длина отрезка которого в блоке равна  $\Delta_{ik}$ ,

$$P_{ik} = \begin{cases} g_{ik}(S_{1,ik}^j - s_{ik}^j); & s_{ik}^j < s_d; \\ g_{ik}(S_{1,ik}^j - s_d); & s_{ik}^j \geq s_d; \end{cases}$$

$$g_{ik} = \frac{T_{ik}}{L_1} \frac{\Delta_{ik}}{r_{1,ik}}.$$

Здесь  $S_{1,ik}^j$  – понижение уровня в водотоке, проходящем через узел  $(x_i, y_k)$ . Величины  $\Delta_{ik}$  берутся с карты, совмещенной с линиями сетки.

Для расчета сокращения стока на участке  $\Gamma_1$  нужно просуммировать фильтрационные потери по всем узлам с учетом участка дождевания  $\Gamma_1$ :

$$Q_1^c = \sum_{(x_i, y_k) \in \Gamma_1'} (S_{1,ik}^j - s_d) \frac{T_{ik} \Delta_{ik}}{L_1} + \sum_{(x_i, y_k) \in \Gamma_1''} (S_{1,ik}^j - s_{ik}^j) \frac{T_{ik} \Delta_{ik}}{L_1}$$

Если отбор подземных вод не влияет на уровенный режим водотоков, то во всех формулах полагаем  $S_{1,ik}^j = 0$ .

Для автоматизации расчетов разработан специализированный комплекс алгоритмов моделирования динамики подземных вод на ЭВМ [5]. На его основе был выполнен ряд оценок влияния водозаборов на окружающую среду [6]. В качестве примера рассмотрим один из подземных водозаборов производительностью  $Q = 21,1$  тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ . Этот объект и результаты его моделирования на электропроводной бумаге подробно описаны в работе [7]. Исследуемую территорию окаймляет река с притоками (рис. 2). Среднегодовые расходы по участкам –  $0,60$ – $1,96$   $\text{м}^3/\text{с}$ , минимальные среднемесячные для года 95%-ной обеспеченности –  $0,20$ – $0,65$   $\text{м}^3/\text{с}$ .

Для расчета принята плановая модель пласта со значениями водопроницаемости 100, 200 и 750  $\text{м}^3/\text{сут}$  и водоотдачи 0,15. Граничные условия показаны на рис. 2. Для всех участков принята единая величина эквивалентной длины пути фильтрации:  $L_1 = 150$  м, что согласуется с режимными наблюдениями.

Рассчитанное сокращение стока по участкам в зависимости от времени приведено на рис. 3. Участок между створами Б и В подвержен наибольшему влиянию водозабора: сокращение стока достигает здесь 46 % от меженного стока года 95 %-ной обеспеченности. В соответствии с [8], на этом участке следует осуществить регулирование или переброску стока с других участков. На других участках сокращение не превышает 15 % от меженного стока маловодного года. Учет влияния сокращения стока на уровенный режим не вносит существенных изменений в результаты расчета.

Для контроля результатов сопоставлено суммарное сокращение стока с расчетом по известной формуле [1]  $Q^c = Q \text{erfc}(d/\sqrt{at})$ , где  $d$  – расстояние от линии водозабора до реки, равное в среднем 1600 м. Уровнепроводность принята равной 5000  $\text{м}^2/\text{сут}$  (по максимальному значению водопроницаемости).

Тем самым получено максимальное суммарное сокращение стока, так как формула предполагает наличие совершенной реки с прямолинейным конту-

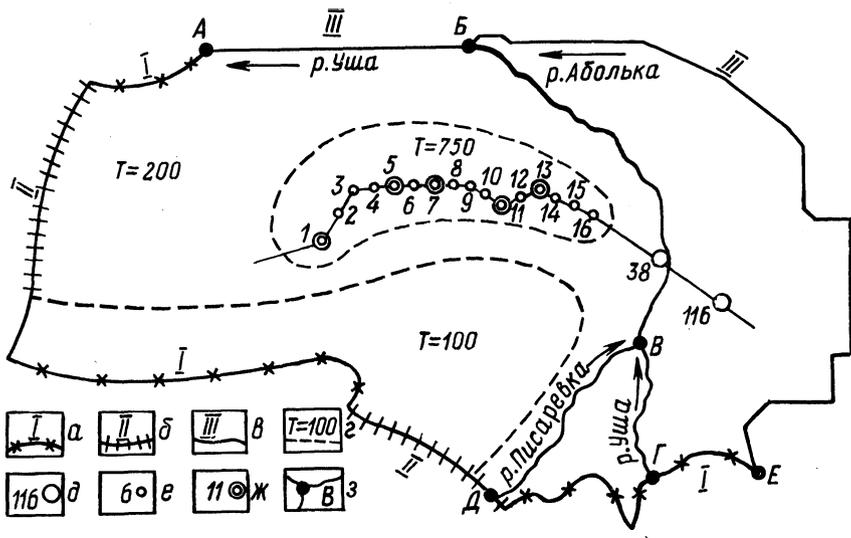


Рис. 2. Схема расположения водозабора: а, б, в – участки с граничными условиями I, II и III рода; г – границы областей с различными водопроводимостями  $T$ ; д, е, ж – скважины: разведочные, проектируемые (эксплуатационные) и разведочно-эксплуатационные, соответственно; з – граничные створы расчетных участков водотока; 1, 2, 3 ... – номера скважин; А, Б, В... – гидрологические створы.

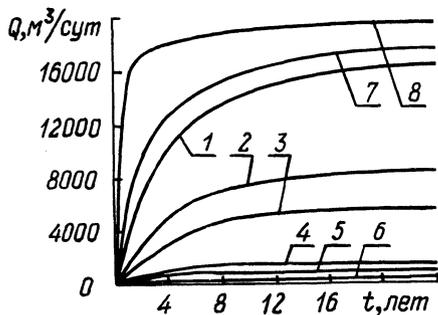


Рис. 3. Распределение сокращения стока по участкам в зависимости от времени: 1 – суммарное сокращение стока; 2 – сокращение стока участка между створами Б и В; 3 – сокращение стока между створами А и Б; 4 – сокращение стока между створами Б и Е; 5 – сокращение стока между створами В и Д; 6 – сокращение стока между створами В и Г; 7 – суммарное сокращение стока по формуле [1]; 8 – суммарное сокращение стока по результатам электро моделирования [1].

ром (см. рис. 3). Здесь же показаны данные электро моделирования сокращения стока [7]. В этом случае темп роста стока явно завышен (превышая этот показатель для совершенной реки в пласте большей проводимости), что объясняется технической сложностью его определения по отдельным участкам при электро моделировании.

Как показал опыт, применение методики наиболее эффективно для дифференцированной оценки сокращения стока системы водотоков по участкам при наличии достаточного объема информации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М и н к и н Е.Л. Взаимосвязь подземных и поверхностных вод и ее значение при решении некоторых гидрогеологических и водохозяйственных задач. – М., 1973. – 104 с.

2. Крашин И.И., Пересунько Д.И. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод методом моделирования. — М., 1976. — 206 с. 3. Усенко В.С., Злотник В.А. Математические модели и численные методы в задачах взаимосвязи безнапорных подземных и поверхностных вод. — Доклады III Международного симпозиума. Киев, 1978, ч. 4, с. 108–117. 4. Шаманский В.Е. Численное решение задач фильтрации грунтовых вод на ЭЦВМ. — Киев, 1969. — 376 с. 5. Злотник В.А. Комплекс алгоритмов моделирования динамики подземных вод. — Алгоритмы и программы (ВНТИЦентр), 1978, № 4, с. 19–20. 6. Совершенствование методики оценки эксплуатационных запасов подземных вод с учетом влияния водозаборов на окружающую среду/В.С.Усенко, А.Х.Альтшульт, В.А.Злотник, М.Ю.Калинин. — Труды Международной ассоциации гидрогеологов. М., 1979, т. 15, с. 333–335. 7. Станкевич Р.А., Сытник Е.В., Черепанский М.М. Исследование влияния водозабора подземных вод на прилегающие территории с учетом взаимосвязи с поверхностными водами. — В сб.: Изучение и использование водных ресурсов. М., 1980, с. 153–159. 8. Указания по установлению минимально допустимых расходов воды в реках для охраны природы (временные)/ЦНИИКИВР. — Минск, 1977. — 31 с.

УДК 551.577.36(476)+628.212.2

П.Д.ГАТИЛЛО, канд.техн.наук,  
А.Н.ОДИНЕЦ (БПИ)

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ ОДНОКРАТНОГО ПРЕВЫШЕНИЯ СУММЫ ОСАДКОВ ЗА ДОЖДЬ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛОРУССИИ

Количество и режим стоков дождевой канализации формируются прежде всего под влиянием атмосферных осадков и таяния снега. В данной работе исследуются характеристики для описания сумм осадков за дожди различной повторяемости.

По аналогии с характеристикой интенсивности выпадения дождей [1] и в данном случае повторяемость сумм осадков целесообразно выражать в виде периодов однократного их превышения, а в распределениях учитывать все многократно наблюдаемые в течение года дожди. Для аналитического описания распределений можно применить уравнение, аналогичное используемым для явлений, многократно повторяющихся в году [2].

Если все дожди, зафиксированные за  $n$  лет плювиографических наблюдений, расположить в убывающем порядке, то для каждого значения суммы осадков за дождь  $h$  может быть установлен период превышения этой суммы

$$p = n/s, \quad (1)$$

где  $n$  — число лет наблюдений;  $s$  — порядковый номер в убывающем ряду члена со значением суммы осадков  $h$  (число дождей с суммами осадков  $\geq h$ ).

Такие эмпирические распределения могут быть графически изображены в системе координат  $(h; p)$ , а уравнение аналитической сглаживающей кривой — представлено в виде

$$h = h_{\text{мин}} + a(\lg \bar{s} + \lg p)^k, \quad (2)$$

где  $h_{\text{мин}}$  — сумма осадков за дождь, принятый в качестве минимального из рассматриваемых;  $a, \bar{s}, k$  — параметры.