

УДК 502/504:551.491.5

**Н. П. КАРПЕНКО, И. М. ЛОМАКИН, В. Ф. ЖАБИН**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРНО-ГЕНЕТИЧЕСКОГО  
И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
В ЗАДАЧАХ ПРИРОДООБУСТРОЙСТВА**

*Главной темой исследований является изучение основных принципов структурно-генетического и гидрогеологического анализа, которые используются в геофильтрационных расчетах гидрогеологических задач на объектах природообустройства. Основная цель исследований – это рассмотрение и использование основных принципов анализа геофильтрационных расчетов, которые используются при прогнозе изменения гидродинамической обстановки под влиянием системы инженерных мероприятий. Научная новизна исследований заключается в разработке предложений по решению задач подпора и дренирования в анизотропной среде и методов учета сопротивления на границе сопряжения потоков с водоотками. Подобная диагностика процесса подпора и его прогноз необходимы при проектировании сооружения и в процессе режимных наблюдений в период наполнения водохранилища. Отмечается значительная роль исследований, учитывающих специфику состава и строения отложений, определяющую неоднородность массива *in situ*, а лабораторное изучение образцов горных пород не дает полного представления о структуре элементов массива. Результатом выполненных исследований является изучение и диагностика условий формирования потоков подземных вод вблизи гидрогеологических границ первого рода, для которых предложены формулы для расчета и рассмотрены условия их применения. Таким образом, несинхронные изменения уровня воды в водохранилище и в анизотропном основании верховой призмы плотины могут привести к колебаниям жесткого сооружения, ослаблению основания и нарушению условий безопасной эксплуатации гидроузла в режиме «наполнение – сработка емкости». Данные исследования могут быть использованы специалистами-гидрогеологами, проектировщиками дренажных, водопонижительных и гидротехнических систем, мелиораторами и др.*

*Природные объекты, геофильтрационные расчеты, инженерные мероприятия, структурные модели, фильтрационное сопротивление, неоднородность среды.*

*The main theme of researches is studying of basic principles of structural-genetic and hydro geological analysis which are used in geofiltration calculations of hydro geological tasks on the objects of environmental engineering. The main target of investigations – consideration and usage of basic principles of the analysis of geofiltration calculations which are used when making forecasts of hydro dynamic situation changing under the influence of the system of engineering measures. The scientific novelty of investigations is development of proposals on solving the tasks of backwater and drainage in the anisotropic medium and methods of resistance accounting on the boundaries of currents connection with watercourses. Similar diagnostics of the backwater process and its forecast are necessary when designing the structure and in the process of the regime observations in the period of the reservoir filling. There is marked a substantial role of researches taking into consideration a specific character of the composition and structure of sediments, the decisive heterogeneity of the massif *in situ*, and the laboratory studying of samples of mountain rocks does not give a full notion about the structure of the massif elements. The result of the fulfilled works is studying and diagnostics of the conditions of formation of ground water currents close to hydro geological boundaries of the first kind for which formulas are proposed for calculation conditions of their application are considered. Thus nonsynchronous changes of water level in the reservoir and in the anisotropic foundation of the dam upstream fill can lead to vibrations of a rigid structure, weakening of the foundation and violation of conditions of safe operation of hydraulic unit in the mode «filling – emptying of the capacity». The investigation data can be used by specialists hydro geologists, designers of drainage, dewatering and hydro engineering systems, land reclamation experts and others.*

*Natural objects, geofiltration calculations, engineering measures, structural models, filtration resistance, heterogeneity of the environment.*

Основная задача в геофильтрационных расчетах гидрогеологических задач – это прогноз изменения гидродинамической обстановки под влиянием системы инженерных мероприятий. Решение поставленной задачи выполнимо лишь на основе, позволяющей охватить интересующий диапазон геолого-структурных и литолого-генетических признаков природного объекта.

С точки зрения геолого-гидрогеологических особенностей природных объектов их изучение включает диагностику водоносных толщ горных пород по определенным признакам и обоснование фильтрационной расчетной схемы, которые необходимо учитывать для выбора типа инженерных задач, параметров массопереноса и граничных условий. В процессе диагностики анализируются структурные, генетические особенности геологической среды, ее литологические характеристики, неоднородность и реакция водоносных систем на антропогенное воздействие.

Совершенно очевидной представляется роль исследований, учитывающих специфику состава и строения отложений, определяющую неоднородность массива *in situ*. Следует отметить, что лабораторное изучение образцов горных пород не дает полного представления о структуре элементов массива. Кроме того, характеристики гетерогенных грунтов, определенные в лабораторных условиях, часто не соответствуют таковым, полученным в естественной ситуации или приближенной к прогнозируемой ситуации.

Связывать параметры гранулометрических кривых с фациальными обстановками недостаточно (иногда и ошибочно) особенно, если кривые построены по результатам экспериментов, непосредственно не увязанных с факторами первоначальной дезинтеграции породы и условий транспортировки материала. Указанные причины формирования отложений являются индивидуальными для конкретного ландшафта и отрезка времени, поэтому целесообразно придерживаться рекомендаций, позволяющих подойти к выделению квазиоднородных литогенетических совокупностей [1].

Процессы подпора и дренирования, происходящие в естественных условиях или в результате хозяйственной деятельности, представляют составляющие глобального водообмена, характеризующего взаимосвязь поверхностных и подземных вод.

Формирование потоков подземных вод вблизи гидрогеологических границ первого рода (водоемов, водотоков) происходит под влиянием дополнительного сопротивления ( $\Delta L$ ), прямо пропорционального потерям напора в пределах зоны контактной кольматации – «дополнительный слой» [2].

Величину сопротивления выражают в метрах эквивалентной дополнительной длины потока, полученной расчетным путем или графическим построением [3]:

$$\Delta L = \Delta l_d + \Delta l_k, \quad (1)$$

где  $\Delta l_d$  – сопротивление по степени вскрытия водоносного пласта;  $\Delta l_k$  – сопротивление по характеру вскрытия «скин-эффект»: биологическое заиливание, механическая кольматация и др.

Формулы для расчета  $\Delta l_d$  и условия их применения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Аналитические способы определения сопротивления дрен

Расчетная схема	Строение пласта	Расчетная формула $\Delta l_d$
Водоем, или водоток, шириной $2b_r$	Однородно-анизотропный двухслойный пласт при $m_2 = m_{1d} = 0,5M$ ; $M = m_2 + m_{1d}$	$\Delta l_d \approx 0,5am_d$ , $a = \sqrt{k_x/k_z}$ ; $\Delta l_d^* \approx 0,5aM$ , $m_d$ – мощность слоя под дном водотока (водоема) (2)
	Двухслойный пласт [3]	$\Delta l_d = \Delta l_{2d} \operatorname{cth} \left( \frac{2b_r}{\Delta L_{2d}} \right)$ , $\Delta l_{2d} = \sqrt{\frac{k_2 m_2 m_{1d}}{k_1}}$ (3)
Береговая дрена (по С. Ф. Аверьянову с изменениями)	Однородно-анизотропный пласт	$L_{bd} = \frac{1}{1 + \frac{L_{nd}}{x_d + \Delta L}}$ , $L_{nd} = 1,47am_d \lg \frac{1}{\sin \frac{\pi d}{2am_d}}$ (4)

В формуле (4), по которой определяется общее сопротивление береговой дрены  $L_{bd}$ , перед  $m_d$  добавляется множитель, учитывающий фильтрационную анизотропию, как в формуле (2).

Из таблицы 1 следует, что практически все дренирующие и питающие

границы потоков грунтовых вод имеют дополнительное фильтрационное сопротивление, которое необходимо учитывать заменой действительной координаты  $x$  на расчетную величину  $X = x + \Delta L$ .

В формулу (3) входит половина ширины естественной дрены, которая может

быть определена, как  $b_r \geq 3\Delta L_2$  для анизотропного двухслойного строения ложа водоема или водотока (рисунок).

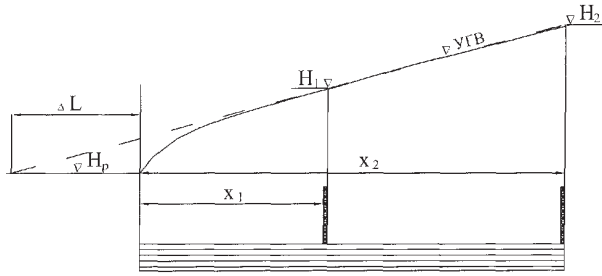


Схема к расчету значения дополнительного сопротивления  $\Delta L$ :  $H_1$  и  $H_2$  — значения напоров в скважинах 1 и 2, соответственно, м;  $x_1$  и  $x_2$  — расстояния от уреза воды до скважины 1 и 2 соответственно, м;  $\Delta L$  — величина дополнительного сопротивления ложа водоема, м;  $\Delta H_p$  — значение напора на границе водоема

Аналитические расчеты дополнительного сопротивления затруднительны, в связи с неопределенностью оценки параметров зоны заиливания: водопроницаемости слоя, мощности или анизотропии.

Наиболее пригодны для практического использования данные измерений положения свободной поверхности стационарного потока грунтовых вод вблизи зоны разгрузки.

При отсутствии инфильтрации имеем [3]:

$$\Delta L = \frac{H_1 - H_p}{H_2 - H_1} (x_2 - x_1) - x_1. \quad (5)$$

Резко анизотропные полускальные горные породы, или тектонические трещины, моноклинально падающие в сторону нижнего бьефа, еще больше усложняют картину подпора в основании плотины. Для анализа процесса лучше использовать уравнение следующего вида из [3]:

$$\frac{\Delta H_n}{\Delta H_r} = 4i^2 \operatorname{erfc}(\lambda) = (1 + 2\lambda^2) \operatorname{erfc}(\lambda) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \lambda \cdot \exp(-\lambda^2), \quad (8)$$

где  $\lambda = X / (2\sqrt{at_z})$ ,  $X = m_p / \sin \beta$ ,  $\beta$  — угол падения пласта — плоскости трещины;  $i$  — комплексная переменная функции ошибок.

При наличии инфильтрации к величинам  $H_1$  и  $H_2$  добавляются слагаемые  $\omega x_1^2 / 2T$  и  $\omega x_2^2 / 2T$  соответственно. Аналитические способы определения сопротивления дрен приведены в таблице 1.

Развитие подпора грунтовых вод в полуограниченном пласте замедляется, если в русле реки залегает анизотропный пласт, имеющий характеристику фильтрационного сопротивления  $\Delta L$ . В этом случае, изменение уровня воды в пласте под основанием низовой грани плотины  $\Delta H_n$  и в водохранилище соответствует связи [3]:

$$\frac{\Delta H_n}{\Delta H_r} = 1 - \exp(\tau^2) \operatorname{erfc}(\tau), \quad (6)$$

$$\tau = \sqrt{\frac{at_z}{\Delta L}},$$

где  $a$  — уровеньпроводность водоносного пласта, м<sup>2</sup>/сут;  $t_z$  — время, сут.

Продолжительность запаздывания подъема на границе пласта ( $x = 0$ ) можно оценить по зависимости от отношения в левой части уравнения (6) по формуле:

$$t_z = 0,25 \frac{\tau^2 m_p \mu}{K_z}, \quad (7)$$

$$\text{при } a \approx \frac{K_x m_p}{\mu},$$

где  $K_z$  — коэффициент вертикальной фильтрации, м/сут;  $\mu$  — недостаток насыщения горных пород;  $m_p$  — глубина точечного пьезометра под основанием плотины от кровли пласта, м; остальные обозначения прежние.

Зависимость  $\Delta H_n / \Delta H_r = f(\tau)$  представлена в таблице 2 из [1].

Таблица 2

Зависимость  $\Delta H_n / \Delta H_r = f(\tau)$

$\Delta$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,83
$\tau$	0,096	0,214	0,36	0,53	0,77	1,11	1,34	1,65	2,07	2,69	3,16

В геофильтрационных расчетах, определив значения  $X$  и  $a$ , задавая различные значения  $\lambda$ , можно прогнозировать соотношения в левой части уравнения (8) и оценивать продолжительность запаздывания.

### Заключение

Таким образом, несинхронные изменения уровня воды в водохранилище и в анизотропном основании верховой призмы плотины могут привести к колебаниям жесткого сооружения, ослаблению основания и нарушению условий безопасной эксплуатации гидроузла в режиме «наполнение — сработка емкости». Подобная

диагностика процесса подпора и его прогноз необходимы при проектировании сооружений и в процессе режимных наблюдений в период наполнения водохранилища.

1. **Жабин В. Ф., Карпенко Н. П., Ломакин И. М.** Формирование гетерогенной среды и регулирование режима грунтовых вод в задачах природообустройства: монография. – М.: МГУП, 2013. – 208 с.

2. **Шестаков В. М.** Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. – М.: МГУ, 1965. – 233 с.

3. **Шестаков В. М., Невечера И. К.,**

**Авилина И. В.** Методика оценки ресурсов подземных вод на участках береговых водозаборов. – М.: МГУ, 2009. – 192 с.

Материал поступил в редакцию 11.11.2014.

**Карпенко Нина Петровна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока»  
E-mail: prkkaarpenko@yandex.ru

**Ломакин Иван Михайлович**, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры «Гидрологии, гидрогеологии и регулирования стока»

**Жабин Виктор Федорович**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент

УДК 502/504:532.546

**ИОФИН З. К.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный технический университет», г. Вологда

## **ВОДНОБАЛАНСОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОДОСБОРОВ РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДА ( НА ПРИМЕРЕ РЕК ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

*В статье выполнена оценка основных членов уравнения водного баланса – суммарного испарения и инфильтрации – для условий Вологодской области. Работа выполнена с помощью линейно-корреляционной модели впервые для оценки слоя инфильтрации в грунтовые воды для исследуемой территории. Отмечается, что в линейно-корреляционной модели на первый план выступает правомерность использования линейной зависимости речного стока от атмосферных осадков и физическая обоснованность модели с точки зрения существующих гидрологических закономерностей на основе генетической теории стока. Это обстоятельство является привлекательным для практического использования линейно-корреляционной модели. В результате исследований установлено, что значения слоев суммарного испарения, вычисленные по линейно-корреляционной модели, оказались меньше примерно в 1,5 раза. Это обстоятельство объясняется включением в суммарное испарение слоя инфильтрации. Максимальные величины суммарного испарения достигали значений 333 мм (р. Сухона – г. Тотьма), 296 мм (р. Сухона – д. Рабаньга). При таких значениях слоев испарения слою инфильтрации минимальны и составили 37 и 14 мм.*

*Уравнение водного баланса, суммарное испарение, инфильтрация в грунтовые воды, линейно-корреляционная модель.*

*In the article assessment of main members of the water balance equation is fulfilled – total evaporation and infiltration – for the conditions of the Vologda region. The work is fulfilled by means of a linear-correlation model for the first time for assessment of the infiltration layer into ground water for the investigated area. It is stated that in the linear-correlation model the legality of usage of linear dependence of the river flow from atmospheric precipitation is brought into the foreground as well as physical substantiality of the model from the point of view of existing hydrological regularities on the basis of the genetic theory of runoff. This circumstance is attractive for the practical usage of the linear-correlation model. As a result of researches it is established that the values of the total evaporation layers calculated according to the linear-correlation model were less by approximately 1,5 times. This circumstance is explained by inclusion of the infiltration layer into the total evaporation. Maximal values of the total evaporation reached the values 333 mm (r. Sukhona – town Totjma), 296 mm (r. Sukhona – v. Rabanjga). With these values of evaporation layers infiltration layers are minimal and were 37 and 14 mm.*

*Equation of water balance, total evaporation, infiltraton into ground water, linear-correlation model.*