



превышает атмосферное, то такой поток называют напорным, то есть в любой его точке обладающим избыточным (манометрическим) давлением. Во втором случае, если давление в воде на этой отметке равно атмосферному, то поток называют безнапорным или со свободной поверхностью. Здесь важно отметить, что свободная поверхность воды в фильтрующей среде дополнительно имеет капиллярную зону, где давление в воде обладает вакуумом, то есть меньше атмосферного. Через эту капиллярную зону также может происходить движение воды, но в гораздо меньшем количестве. Практически важные зависимости движения воды в капиллярной зоне были получены в нашей стране и за рубежом. В отечественной практике широкую известность получила формула С.Ф. Аверьянова [7]. За рубежом чаще используют зависимость, которую получил Ван Генухтен [8].

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПОРНО-БЕЗНАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ

Рассмотрим методологию моделирования напорно-безнапорной фильтрации воды в городском строительстве. Наличие таких потоков в зданиях, сооружениях и на территориях застройки можно перечислить в следующих примерах: основания и фундаменты зданий, дорожные слои, конструкции стен и кровель, геологические напластования сложного генезиса с чередованием проницаемых и водоупорных слоёв, например, песчаных и глинистых и т.д.

Методологию следует начать с рассмотрения простейшего одномерного случая напорно-безнапорной фильтрации воды, который показан на рис. 1. Область фильтрации длиной  $L$  разделена на напорную зону длиной  $B$  и безнапорную зону длиной  $C$ . В случае установившегося, стационарного процесса фильтрации воды слева направо (показано на рис. 1 стрелкой) точка  $A$ , разделяющая область фильтрации на две зоны, будет всегда неподвижна. В напорной зоне  $B$  напоры обозначим как  $H$ , при этом они отсчитываются от водоупорной подошвы 5 до напорной линии 1. В этой зоне напор  $H$  и мощность  $M$  обычно не совпадают, причём  $M$  всегда меньше, чем  $H$ . В безнапорной зоне  $C$  напор и мощность совпадают и обозначены маленькой буквой  $h$ . В этой зоне в стационарных условиях свободная поверхность воды 2 принимает форму параболы Дюпюи [9], что было точно доказано И.А. Чарным [4]. Водоносный пласт, через который

происходит движение фильтрационного потока воды, обозначен цифрой 4. Водоносным пластом может быть любой проницаемый грунт или искусственный материал. Сверху этого пласта расположен водоупорный слой 3 – это может быть глина, скала, бетон, асфальт и т.д. Слева от области фильтрации длиной  $L$  расположен водоём, создающий граничное условие (ГУ) 1-го рода с постоянным напором  $H_1$ . Зарубежная терминология называет ГУ условием Дирихле. Справа от области фильтрации длиной  $L$  расположен другой водоём с постоянным напором  $H_2$ . Правое и левое граничные условия с постоянным напором обеспечивают установившуюся стационарную фильтрацию воды в направлении оси  $x$  с постоянным расходом воды на 1 метр ширины фронта потока. Термин «водоём» у нас принят условно. Например, в качестве таких водоёмов можно представить себе ямы на разбитых автомобильных дорогах, заполненные водой весной при снеготаянии или летом после затяжных дождей. Тогда поверхностная вода из этих ям начинает просачиваться через проницаемые слои песка и щебня под дорогой, создавая её подтопление. Процесс фильтрации при этом как раз является случаем напорно-безнапорного течения воды, например слой 3 на рис. 1 может быть асфальтовым покрытием, которое обладает водоупорными свойствами вследствие пропитки его битумом. Немаловажной является своевременная информация об осеннем подтоплении городских дорог, так как такие дороги зимой будут подвергаться морозному пучению и ещё большему разрушению от идущего транспорта. Вот почему весной городские дороги после схода снега оказываются ещё больше разбитыми, чем до этого осенью.

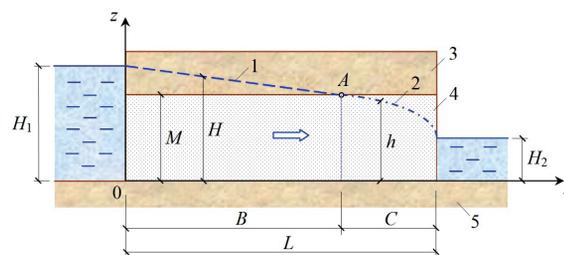


Рисунок 1

Более сложным случаем является процесс нестационарной (неустановившейся) фильтрации воды с напорно-безнапорным течением. Тогда точка  $A$ , разделяющая напорную и безнапорную зоны (см. рис. 1), движется на-

право или налево. Направление этого движения зависит от начальных условий рассматриваемого процесса, то есть от его предыдущей истории. Например, если уровень воды в левом водоёме не изменяется во времени, а уровень воды в правом водоёме зависит от водопритока из водоносного пласта 4, то движение фильтрующейся воды с напорно-безнапорным течением будет всегда нестационарным (неустановившимся). При этом, напор слева  $H_1$  весь период фильтрации является величиной постоянной, константой. Это соответствует граничному условию 1-го рода (условие Дирихле). На правой границе водоносного пласта напор  $H_2$  зависит от водопритока, который, в свою очередь, зависит от перепада напоров  $H_1$  и  $H_2$ . Это соответствует смешанному граничному условию (Дирихле-Неймана), которое также называют граничным условием 3-го рода. В рассматриваемом примере уровень воды в правом водоёме будет постепенно подниматься, то есть создавать подпор и ухудшение дренирования водоносного пласта 4. Точка А будет смещаться направо. Напорная зона шириной В будет увеличиваться, а безнапорная зона шириной С, наоборот, будет уменьшаться. Когда уровень воды в правом водоёме достигнет высотной отметки М, которая соответствует водоупорной кровле, то движение воды в проницаемом грунте или материале станет напорным по всей длине области фильтрации L (см. рис. 1), однако нестационарность фильтрационного процесса не исчезнет. Процесс подтопления и затопления правого водоёма прекратится лишь при выравнивании напоров  $H_1$  и  $H_2$ , постепенно замедляясь.

Далее изложим нашу гипотезу теории фильтрации, которая позволяет вывести её на новый уровень представлений о движении воды в трещиновато-пористых средах с напорно-безнапорными течениями. Свободная поверхность воды 2 (см. рис. 1) по классическому определению соответствует давлению, равному атмосферному. Традиционно считают [1], что если в условиях нестационарного напорно-безнапорного течения в точке А напорная линия 1 отрывается от водоупорной кровли 3, то давление на появившейся свободной поверхности 2 мгновенно становится равным атмосферному. С таким предположением ещё можно согласиться, если выше уровня свободной поверхности имеется зона аэрации, поры и трещины которой насыщены атмосферным воздухом. В отличие от такой традиционной точки зрения, на наш взгляд, давление при нестационарной фильтрации на отрывающейся от водоупорной кровли 3 свободной поверхно-

сти воды некоторое время остаётся в состоянии вакуума, то есть ниже атмосферного. Это можно объяснить тем, что выше точки А (см. рис. 1) расположен водоупор. Атмосферное давление не может свободно проникать от уровня земли до уровня подземных вод (УПВ). В случае, показанном на рис. 1, прорыв воздуха возможен лишь со стороны правой вертикальной границы области фильтрации 4 между уровнем воды в правом водоёме и нижней границей водоупорного слоя 3. То есть между вертикальными высотными отметками  $H_2$  и М. При отсутствии доступа воздуха участок водоносного пласта становится подобен сифонному трубопроводу, работающему с наличием вакуума.

Аналитическое решение самого простого случая стационарной напорно-безнапорной фильтрации, показанное на рис. 1, рассмотрено В.И. Аравиным и С.Н. Нумеровым [10]. Получение решения в виде формулы в случае нестационарной фильтрации затруднительно. Поэтому приходится прибегать к моделированию процесса. В последнее время наиболее удобной технологией моделирования фильтрации является компьютерное, с использованием численных алгоритмов. Нестационарные задачи эффективнее всего решать методом конечных разностей [11]. В качестве инструмента моделирования предложен авторский метод электронных таблиц. Движение ползущей границы предложено реализовывать с помощью условного оператора программирования «Если (If)».

Чтобы избежать ошибок линеаризации, иногда надо вообще от неё отказываться, переходя к моделированию без введения средней мощности водоносного пласта. Рассмотрим это на примере метода конечных разностей (МКР). Данный метод широко использован в нашей монографии 2002 года издания «Фильтрационные расчёты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве», за подробностями туда и отсылаем читателя. Эту монографию с нашими исключительными авторскими правами можно свободно скачать в электронном виде по следующим адресам:

<http://sologaev.ucoz.ru>

<http://sologaev.umi.ru>

Представляя напорно-безнапорный фильтрационный поток в виде сетки, разбитой на пространственные шаги, в каждом узле сетки имеем определённый напор воды. Связывая по закону Дарси соседние узлы сетки, получаем элементарный фильтрационный расход. Вместо введения средней мощности пласта во всех узлах сетки, принимаем мощность

(толщину) водонасыщенного слоя как среднее арифметическое между соседними узлами. Постепенное уменьшение пространственного шага узлов сетки позволяет гарантированно избавиться от погрешностей осреднения.

МКР-схему лучше всего принимать явную, для нестационарной фильтрации подземных вод. Строго говоря, в терминах вычислительной математики, следует применять явную разностную схему для решения дифференциальных уравнений фильтрации параболического типа, то есть для нестационарного движения подземных вод в плане в рамках гипотезы Буссинеска.

Возвращаясь к обсуждению гидравлической теории фильтрации применительно к напорно-безнапорному течению воды, можно отметить, что чистое моделирование нелинейных задач фильтрации не является универсальным инструментом исследования. Дело в том, что компьютерная модель всегда отражает какой-то конкретный частный случай фильтрации. В отличие от этого, если удаётся получить аналитическое решение нелинейной задачи фильтрации, то оно из-за своей универсальности охватывает уже целый класс подобных задач. Мы рекомендуем для целей защиты от подтопления в городском строительстве использовать наш метод автоматизированных движений с численным моделированием (АДЧМ). Он впервые описан с примерами в нашей монографии 2002 года. Необходимо дальнейшее его развитие с целью получения аналитических формул, позволяющих более точно рассчитать фильтрационные напоры и расходы воды при движении по проницаемым слоям конструкций, принятых в городском строительстве, с учётом напорно-безнапорного течения воды. Кроме того, решение таких задач позволяет обосновать защиту от загрязнения подземных вод [12].

### ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Таким образом, рассмотрена методология моделирования напорно-безнапорной фильтрации воды в городском строительстве. Изложена гипотеза теории фильтрации, которая позволяет вывести её на новый уровень представлений о движении воды в трещиновато-пористых средах с напорно-безнапорными течениями. В отличие от традиционной точки зрения, давление при нестационарной фильтрации на отрывающейся от водоупорной кровли свободной поверхности воды некоторое время остаётся в состоянии вакуума, то есть ниже атмосферного В качестве инстру-

мента моделирования предложен авторский метод электронных таблиц. Движение ползущей границы предложено реализовывать с помощью условного оператора программирования. Указаны направления дальнейшего развития предложенной методологии, в том числе и в области получения аналитических зависимостей, что может быть полезно аспирантам и докторантам, а также научным работникам по борьбе с подтоплением в городском строительстве.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917-1967) / Под ред. П.Я. Полубариновой-Кочиной. – М.: Наука, 1969. – 546 с.
2. Павловский, Н.Н. Теория движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями и ее основные приложения / Н.Н. Павловский. – Петроград: Изд-во Научно-мелиорационного института, 1922. – 752 с.
3. Куранов, Н.П. О связи гидродинамической и гидравлической теорий фильтрации и способах их линеаризации при исследовании вопросов подтопления территорий грунтовыми водами / Н.П. Куранов // Инженерная защита территорий. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1982. – С. 5-20.
4. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод / П.Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
5. Darcy H. Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Victor Dalmont, 1856. 647 p.
6. Прогнозы подтопления и расчёт дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях: Справочное пособие к СНиП / А.Ж. Муфтахов, И.В. Коринченко, Н.М. Григорьева, А.П. Шевчик и др.; ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Стройиздат, 1991. – 272 с.
7. Аверьянов, С.Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод / С.Ф. Аверьянов. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – С. 85-447.
8. Van Genuchten, M.T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1980, 44, p. 892–898.
9. Dupuit J. Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables. Paris: Dunod editeur, 1863. 304 p.
10. Аравин, В.И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде / В.И. Аравин, В.И., С.Н. Нумеров. – М.: Гостехтеориздат, 1953. – 616 с.

11. Поршнеv, С.В. Вычислительная математика / С.В. Поршнеv. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 320 с.

12. Куранов, П.Н. Использование концепции наилучших доступных технологий при

обосновании системы инженерной защиты природных вод от загрязнения / П.Н. Куранов // Водоснабжение и санитарная техника. – М., 2015. – 9. – С. 22-29.

## **ABOUT MODELING OF PRESSURE-FREE PRESSURE FILTRATION OF WATER IN URBAN CONSTRUCTION**

V.I. Sologaev

**Annotation.** *The methodology of modeling pressure-free pressure filtration of water in urban construction is considered. A feature of this process is the presence of a creeping boundary of the free surface of water in a fractured porous medium if real nonstationary flows are considered as a function of time. The simplest one-dimensional case of pressure-free pressure filtration of water is considered. The hypothesis of the theory of filtration is stated, which allows to bring it to a new level of ideas about the motion of water in fractured-porous media with pressure-free flow. In contrast to the traditional point of view, the pressure for non-stationary filtration on the free surface of the water surface leaving the waterproof roof remains for some time in a state of vacuum, that is, below atmospheric. The author's method of spreadsheets is proposed as a modeling tool. The motion of the creeping boundary is suggested to be realized using a conditional programming operator. The directions of the further development of the proposed methodology are indicated.*

**Keywords:** *theory of filtration, pressure-free flow, underflooding.*

### **REFERENCES**

1. Development of filtration theory research in the USSR (1917-1967) / Ed. P.Y. Polubarinova-Cochina. M. : Nauka, 1969. 546 p.

2. Pavlovsky N.N. Theory of movement of groundwater under hydraulic engineering constructions and its main applications. Petrograd: Publishing House of Science and melioration institute, 1922. 752 p.

3. Kuranov N.P. About the relationship between hydrodynamic and hydraulic filtration theories and methods of linearization in the study of the issues of flooding areas groundwater. Engineering protection of territories. M. : Institute VODGEO, 1982. P. 5-20.

4. Polubarinova-Cochina P.Y. Motion Theory groundwater. M. : Nauka, 1977. 664 p.

5. Darcy H. Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Victor Dalmont, 1856. 647 p.

6. The forecasts of flooding and calculation of drainage systems in built-up and built-up areas: A Reference Guide to the SNP / A.Z. Muftakhov, I.V. Korinchenko, N.M. Grigorieva, .AP. Szewczyk et al; Institute VODGEO. M. : Stroyizdat, 1991. 272 p.

7. Averyanov S.F. Filtering of the channels and its effect on the groundwater regime. M. : Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1956. P. 85-447.

8. Van Genuchten, M.T. A Closed-form Equa-

tion for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 1980, 44, p. 892–898.

9. Dupuit J. Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables. Paris: Dunod editeur, 1863. 304 p.

10. Aravin V.I., Numerov S.N. The theory of the movement of fluids and gases in non-deformable porous medium. M: Gostehteorizdat, 1953. 616 p.

11. Porshnev S.V. Computational Mathematics. SPb. : BHV-Petersburg, 2004. 320 p.

12. Kuranov P.N. Using the concept of best available techniques in the justification of engineering protection of natural waters from pollution. Water supply and sanitary engineering. M., 2015. N 9. P. 22-29.

*Сологаев Валерий Иванович (Россия, Омск) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры городского строительства и хозяйство Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ), (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sologaev2010@yandex.ru).*

*Sologaev Valery Ivanovich (Russia, Omsk) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department urban development of The Siberian Automobile and Highway Academy (SibADI) (644080, Russia, Omsk, Mira, 5, e-mail: sologaev2010@yandex.ru).*