



*мощности (толщины). В тоже время такие условия не свойственны дорожным конструкциям, где имеют место достаточно тонкие слои. При этом водонасыщенные слои дорог могут перемежаться с водоупорными слоями. Например, асфальтовый слой является гидроизоляцией, а слой щебня или песка, наоборот, является дренирующим, то есть пропускающим воду в заданном направлении. Наличие тонких водоносных слоёв в конструкциях дорог вызывает существенные нелинейности в математическом описании исходных дифференциальных уравнений фильтрации. Поэтому в данной работе автор предлагает новый подход для фильтрационных расчётов и компьютерного моделирования при защите от подтопления дорог. Суть этого подхода состоит в использовании оригинального метода сочетания автомодельных движений и численного моделирования фильтрации воды в тонких слоях дорожных конструкций.*

*Ключевые слова: теория фильтрации, дорожные конструкции, подтопление.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Движение воды по порам и трещинам дорожных конструкций всегда представляет научный и практический интерес. Своевременное удаление лишней воды из дорожных слоёв избавляет дорогу от преждевременного разрушения в виде вымывания строительного материала или морозного пучения. Защита от подтопления дорог является актуальной проблемой. Упомянутое движение воды чаще всего происходит в ламинарном режиме. Поэтому расчёт и моделирование этого процесса можно проводить в рамках классической теории фильтрации, основанной на законе Дарси. Однако готовые аналитические решения в виде удобных инженерных формул, полученных на основе закона Дарси, следует применять с осторожностью. Особенно в сфере дорожного строительства. Это связано с тем, что слои дорожных конструкций относительно тонкие, их толщина редко превышает размер более одного метра. В следствие этого надо всегда помнить, что известные решения в теории фильтрации были получены в XIX-XX веках в основном для водоносных пластов мощностью (толщиной), как правило, превышающих несколько метров или даже десятков метров. Это объяснимо особенностью применения данных решений для целей водоснабжения, защиты от подтопления в городском строительстве и сельскохозяйственной мелиорации, а также в горнодобывающей промышленности. В тоже время такие условия не свойственны дорожным конструкциям, где имеют место достаточно тонкие слои. При этом водонасыщенные слои дорог могут перемежаться с водоупорными слоями. Например, асфальтовый слой является гидроизоляцией, а слой щебня или песка, наоборот, является дренирующим, то есть пропускающим воду в заданном направлении. Наличие тонких водоносных слоёв в конструкциях дорог вызывает существенные нелинейности в математическом описании исходных

дифференциальных уравнений фильтрации. Поэтому в данной работе автор предлагает новый подход для фильтрационных расчётов и компьютерного моделирования при защите от подтопления дорог. Суть этого подхода состоит в использовании оригинального метода сочетания автомодельных движений и численного моделирования фильтрации воды в тонких слоях дорожных конструкций.

## **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Подавляющее большинство потоков воды, просачивающихся через поры и трещины, движется в ламинарном режиме [1-9]. Если сплошность такого потока не нарушается, то он с достаточной для практики точностью может быть объяснён и рассчитан с помощью эмпирического закона Дарси. Этот закон соблюдается даже в глинах, что было доказано В.М Павилонским. Производя многолетние лабораторные опыты в связи с проблемой хранения токсичных жидких отходов, данный автор обнаружил в 1964 году [10], что начального градиента напора не существует даже для глин. В последствии, на конференции в Дублине он подробно доложил об этом международной научной общественности [11]. Несколько позднее, Х.В. Олсен также подтвердил отсутствие начального градиента напора [12, 13]. Тем не менее, в смежных технических науках, а именно в механике грунтов и проектировании фундаментов зданий и сооружений, можно встретить утверждение о существовании начального градиента напора воды, при котором якобы фильтрационного движения воды не происходит. Данные разногласия между теорией фильтрации и механикой грунтов не устранены до сих пор.

Гидравлическая теория фильтрации воды находит широкое применение в гидрогеологии, водоснабжении, при защите от подтопления городов и сельскохозяйственных территорий. Её

основной принцип состоит в том, что движение подземных вод упрощают до одномерного. Похожий принцип применяют в гидравлике трубопроводов. Но в теории фильтрации не всё так просто. Прежде всего необходимо отметить существование двух подходов: детерминированного и стохастического. Практика защиты от подтопления показывает, что первый подход (детерминированный) доминирует среди инженеров и гидрогеологов. В свою очередь, сама теория фильтрации подразделяется на гидравлическую и гидродинамическую.

Дифференциальные уравнения гидравлической теории фильтрации также подразделяются на линеаризованные и нелинейные. В первом случае, когда дифференциальные уравнения фильтрации сводят к линейным, получаемые аналитические решения обладают свойством суперпозиции. Это означает, что если реальный процесс фильтрации воды действительно близок к идеализированной схеме в виде линейного дифференциального уравнения, то рассчитав воздействие от одного источника возмущения водоносного пласта, а затем от другого, далее результаты расчёта можно сложить алгебраически. Однако при такой идеализации исследователь (инженер, проектировщик и т.д.) может совершить грубейшую ошибку методологии, когда в действительности процесс фильтрации воды не может быть описан линейными дифференциальными уравнениями. Выходом из такого, более сложного, случая является отказ от использования аналитических формул гидравлической линеаризованной теории фильтрации и переход на нелинейное численное моделирование. Попутно отметим, что связь гидродинамической и гидравлической теорий фильтрации и способы их линеаризации при исследовании вопросов подтопления территорий грунтовыми водами аналитическими методами исследовал Н.П. Куранов [14].

Применение численного моделирования также требует аккуратности, так как исследователь может впасть в ту же ошибку, что и при использовании гидравлической линеаризованной теории фильтрации. Например, типичной ошибкой является введение средней мощности (толщины) водоносного пласта, хотя это является заманчивым, так как сильно упрощает формулы моделирования. Для подземных вод значительной мощности в сфере водоснабжения и гидрогеологии это не является ошибкой там, где водонасыщенные слои простираются до значительных глубин. Однако в условиях дорожного строительства конструктивные

дренажные слои достаточно тонкие, чаще всего меньше одного метра. Поэтому введение средней мощности водоносного пласта существенно огрубляет расчёт при переходе течения воды из напорного в безнапорный с появлением свободных поверхностей воды, так как разности напоров (уровней подземных вод) могут превышать их мощности.

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 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. При этом при увеличении количества узлов сетки больше миллиона может возникнуть проблема замедления времени расчёта компьютерной модели. Особенно этот нежелательный эффект проявляется в случае применения языков программирования интерпретирующего типа или при использовании для моделирования методом конечных разностей электронных таблиц типа Excel или подобных. Реальный расчёт больших моделей в таких случаях может достигать нескольких часов или даже суток даже на самых быстрых современных компьютерах. Такие численные модели не удобны для практического использования.

Выходом из положения является переход на построение компьютерной модели с помощью языка программирования, использующего компилятор с созданием исполняемого файла. Операционная система (ОС) может

быть не обязательно Windows. Неплохие результаты показывают Unix-подобные системы типа Linux, дополнительной особенностью которых является их свободное использование. В любом случае (проприетарной или свободной ОС) надо будет выбрать компилирующий язык программирования. По нашим исследованиям, проведённым в последние годы на реальных объектах защиты от подтопления, наилучшим языком программирования является Fortran стандарта 1995 года или более позднего. Причём как в коммерческом варианте, например, Intel Fortran, так и в свободном типа GFortran. Попутно следует отметить, что для целей нашего моделирования вовсе не обязательно использования каких-либо визуальных оболочек программирования. Достаточно скомпилировать консольную исполняемую программу, которая считывает исходные данные модели из текстового файла и после окончания расчёта модели записывает выходные данные в другой текстовый файл. Из последнего, например, данные по распределению полей напоров фильтрующейся воды могут быть обработаны для визуализации особыми программами типа Surfer.

Попутно следует отметить, что известная компьютерная программа геологической службы США ModFlow PMwin [15, 16], версия 5.3 которой официально сертифицирована для применения в России, способна применять МКР-модели с максимальным количеством узлов не более 250 тысяч. Что для целей нашего моделирования фильтрационных задач с количеством узлов более 1 миллиона не пригодно.

Поэтому в плане инновации решено построить МКР-модель фильтрационного потока с оригинальной разработкой на языке программирования Fortran. При этом с целью независимости от иностранных технологий (импортозамещение) использовано свободное программное обеспечение с 64-битной операционной системой Linux. Компилятор Фортрана gfortran. Исходный код программы записан в файле geo.f95 и скомпилирован в исполняемый файл geo\_exe такой командой:

```
gfortran -std=f95 geo.f95 geo_exe
```

В самом начале кода программы было применено новое ключевое слово Фортрана allocatable, для объявления массива напоров, а именно так:

```
real, allocatable :: H0(:,:)
```

```
real, allocatable :: H(:,:)
```

где H0 – начальные напоры непониженного УПВ; H – напоры УПВ при дренировании.

Это позволило записывать программный код компактно, без применения громоздких ци-

клов, как, например, обычно принято в ФОРТРАН 77.

МКР-схема была принята явная, для нестационарной фильтрации подземных вод. Строго говоря, в терминах вычислительной математики, мы применили явную разностную схему для решения дифференциальных уравнений фильтрации параболического типа, то есть для нестационарного движения подземных вод в плане в рамках гипотезы Буссинеска.

В отличие от традиционного алгоритма вычислительной математики с циклом for-end [17, с. 185] для решения упомянутой разностной схемы был применён вложенный цикл Фортрана do-end. Суть данного приёма в том, что параметр времени моделирования вынесен из тела массива. Этот особый алгоритмический приём позволил избавиться от ограничения памяти персонального компьютера (ПК). То есть, фактически, предохраниться от overflow-переполнения оперативной памяти ПК. В результате алгоритм стал быстрым. Тесты показали увеличение скорости расчёта модели на три порядка, то есть примерно в тысячу раз.

Возвращаясь к обсуждению гидравлической теории фильтрации применительно к тонким слоям дорожных конструкций, 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 дорожном строительстве использовать наш метод автомодельных 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 дренирующим слоям дорожных конструкций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предпринято исследование по совершенствованию методологии расчёта и моделирования движения фильтрационных потоков воды применительно к тонким слоям дорожных конструкций. Работа носит постановочный характер и предназначена для акцентирования внимания исследователей на

возможные перспективные технологии, связанные с проектированием защиты от подтопления в сфере дорожного строительства. При этом обращено внимание на возможные ошибки, которые могут возникать в ходе обоснования применения аналитического расчёта и компьютерного моделирования по рассматриваемой теме дренирования дорог.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Полубаринова-Кочина, П.Я. Теория движения грунтовых вод / П.Я. Полубаринова-Кочина. – М. : Наука, 1977. – 664 с.
5. 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.
6. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917-1967) / под ред. П.Я. Полубариновой-Кочиной. – М.: Наука, 1969. – 546 с.
7. Darcy H. Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Victor Dalmont, 1856. 647 p.
8. 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.

9. Forchheimer Ph. Hydraulik. Leipzig, Berlin: Teubner, 1924. 556 s.

10. Павилонский, В.М. Метод определения коэффициента фильтрации глинистых грунтов / В.М. Павилонский // Труды ин-та «ВОДГЕО», вып. 7. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1964. – С. 59-79.

11. Pavilonsky V. M. The absence of threshold gradient in clayey soils //Groundwater Eff. Geotechn. Eng: Proc. 9th Eur. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Dublin, 31 Aug. 3 Sept., 1987. Vol. 2. Rotterdam; Boston, 1987. P. 917- 921.

12. Olsen H.W. Darcy's law in saturated kaolinite // Water Resources Res. 1966. 2. P. 287-296

13. Olsen H.W. Deviations from Darcy's law in saturated clays // Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 1965. 29. P. 135-140.

14. 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.

15. Chiang W.-H., Kinzelbach W. Processing Modflow: a simulation system for modeling groundwater flow and pollution. -Hamburg-Zürich, 1998. 225 p.

16. Куранов, П.Н. Использование концепции наилучших доступных технологий при обосновании системы инженерной защиты природных вод от загрязнения / П.Н. Куранов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 9. – С. 22-29.

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

#### **Application of the theory of filtration in thin layers of road constructions**

**Annotation.** *In this study, the problem of the application of the theory of filtration of water in thin layers of road constructions from the point of view of protection against underflooding. Classical theory of filtration using Darcy's law, the corresponding laminar regime movement. The vast majority of known analytical solutions of differential equations of filtration refers to the so-called hydraulic filtration theory. These solutions are obtained mainly in the field of water supply, protection against underflooding in urban construction and agricultural reclamation, as well as in the mining industry, for the aquifer conditions heavy duty enough (thickness). At the same time, these conditions are not peculiar to the road structure, where there are quite thin layers. At the same time water-saturated layers of roads are interspersed with waterproof layers. For example, asphalt is a waterproofing layer, and a layer of sand or gravel, on the contrary, is draining, that is water-permeable in a predetermined direction. The presence of thin layers of water-bearing structures in the road causes significant nonlinearity in the mathematical description of the initial differential equations of filtration. Therefore, in this paper, the author proposes a new approach for filtering calculations and computer modeling in the protection against underflooding of roads. The essence of this approach is to use the original method of a combination of self-similar motions, and numerical modeling of water filtration in thin layers of road constructions.*

**Keywords:** *theory of filtration, road construction, underflooding.*

REFERENCES

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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

5. 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.

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

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

8. 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.

9. Forchheimer Ph. Hydraulik. Leipzig, Berlin: Teubner, 1924. 556 s.

10. Pavilonsky V.M. Method for determination of the hydraulic conductivity of clay soils. Proceedings of Inst "VODGEO", vol. 7. M.: Institute VODGEO, 1964. - P. 59-79.

11. Pavilonsky V. M. The absence of threshold gradient in clayey soils //Groundwater Eff.

Geotechn. Eng: Proc. 9th Eur. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Dublin, 31 Aug. 3 Sept., 1987. Vol. 2. Rotterdam; Boston, 1987. P. 917- 921.

12. Olsen H.W. Darcy's law in saturated kaolinite // Water Resources Res. 1966. 2. P. 287-296

13. Olsen H.W. Deviations from Darcy's law in saturated clays // Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 1965. 29. P. 135-140.

14. 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.

15. Chiang W.-H., Kinzelbach W. Processing Modflow: a simulation system for modeling groundwater flow and pollution. -Hamburg-Zürich, 1998. 225 p.

16. 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.

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

*Сологаев Валерий Иванович (Россия, Омск) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры городского строительства и хозяйство Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (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 University (SibADI) (644080, Russia, Omsk, Mira, 5, e-mail: sologaev2010@yandex.ru).*

УДК 624.21.011.1:691.1

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДОЩАТО-ГВОЗДЕВЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

*В.А. Уткин, П.Н. Кобзев  
ФГБОУ ВО«СибАДИ», Россия, г. Омск*

**Аннотация.** *Статья посвящена внедрению в практику строительства мостов новых дощато-гвоздевых пролетных строений, отвечающих современным требованиям по грузоподъемности, надежности и долговечности. Авторами предложена и описывается новая конструкция пролетного строения из дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков с продольно-попереч-*