

DOI: 10.32347/2076-815x.2022.79.190-198

УДК 628.161

к.т.н., доцент **Кравчук О.А.**,
kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6578-8896,
Київський національний університет будівництва і архітектури,
Кравчук О.Я.,
olgakravchuk56@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2616-5455,
Національний транспортний університет

ЗАЛЕЖНІСТЬ КОЕФІЦІЄНТА ФІЛЬТРАЦІЇ ВІД ПОРИСТОСТІ ФІЛЬТРУЮЧОГО МАТЕРІАЛУ ШВИДКИХ ФІЛЬТРІВ

На базі проведених авторами експериментальних досліджень визначено важливі характеристики фільтруючого завантаження швидких фільтрів, такі як коефіцієнт фільтрації, пористість і швидкість фільтрування. Встановлено співвідношення між вказаними параметрами, а також характер їх зміни як за висотою фільтруючого шару, так і з часом протягом роботи споруди. Приведено схему і розглянуто особливості роботи розробленого і змонтованого експериментального стенду, який складається з фільтрувальної колони, піщаного фільтруючого завантаження з початковою пористістю $n = 0,47$. Вимірювання проводились при різних початкових швидкостях руху води $V_0 = 4,08$ м/год, $6,93$ м/год, $9,78$ м/год, $13,04$ м/год і концентраціях модельних забруднень $C_0 = 50$ мг/дм³, 100 мг/дм³. За результатами вимірювань були отримані експериментальні залежності і співвідношення між основними дослідними параметрами. А саме, між пористістю і коефіцієнтом фільтрації фільтруючого матеріалу, між пористістю і швидкістю фільтрування. Проведено аналіз в безрозмірній формі отриманих даних, побудовано необхідні графіки і підібрані відповідні емпіричні залежності. Підтверджено ефект зменшення коефіцієнта фільтрації зернистого матеріалу і швидкості фільтрування при зменшенні пористості піску. Показано, що на початкових етапах процесу фільтрування замулення завантаження і швидкість фільтрування змінюються не суттєво, з часом інтенсивність цих процесів зростає і досягає свого максимуму в кінці циклу фільтрування.

Ключові слова: швидкий фільтр; завантаження фільтра; швидкість фільтрування; коефіцієнт фільтрації; пористість; осад.

Постановка проблеми. Одними із основних споруд, які застосовуються для очистки питних і доочистки очищених стічних вод, є швидкі фільтри. Якість очищення води на фільтрах залежить від багатьох факторів, в тому числі від типу забруднень, які необхідно видалити з води, і від матеріалу

фільтруючого завантаження. В якості фільтруючого матеріалу зазвичай слугують різні насипні зернисті матеріали, в тому числі кварцовий пісок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню особливостей роботи швидких фільтрів в технічній літературі приділено досить багато уваги [1-3]. Особливо це стосується аналізу фільтраційних і гідравлічних характеристик фільтруючого завантаження [4-5]. Однак, основна маса робіт присвячена випадку роботи фільтрувальних споруд з постійною швидкістю фільтрування. Випадку роботи очисної фільтрувальної споруди зі змінною швидкістю фільтрування приділено значно менше уваги [6-8].

Метою представленої роботи є вивчення умов роботи швидкого фільтра зі змінною швидкістю фільтрування, зокрема визначення характеру зміни коефіцієнта фільтрації і швидкості фільтрування в залежності від пористості фільтруючого завантаження в процесі роботи фільтра.

Результати та їх обґрунтування. Перед виконанням основних досліджень моделі попередньо була проведена окрема серія вимірювань характеристик фільтруючого матеріалу завантаження і модельних забруднень. В якості фільтруючого завантаження використовувався кварцевий пісок аналогічний тому, що застосовується на діючих очисних спорудах Дніпровської очисної станції водопроводу м. Києва, в якості забруднень – спондилова глина.

При цьому визначались: насипна густина піску – $\rho_n = 1,412 \text{ г/см}^3$; істинна густина піску – $\rho_i = 2,65 \text{ г/см}^3$; пористість (пустотність) піску – 47%; зерновий склад і модуль крупності піску; еквівалентний діаметр часток піску – $d_{екв} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; середній коефіцієнт форми частинок піску становило – $k_{\phi} = 1,19$; середній діаметр частинок спондилової глини – $d_{сер} = 7,7 \text{ мкм}$. За результатами рентгенофазного аналізу було встановлено, що досліджуваний пісок – кварц з домішками альбіту.

Для проведення експериментальних досліджень в лабораторії кафедри водопостачання та водовідведення Київського національного університету будівництва і архітектури була змонтована дослідна установка, схема якої приведена на рис. 1.

Установка працювала наступним чином. Водопровідна вода подавалася трубопроводом (1) в бак приготування суспензії (2), відповідна концентрація якої досягалась шляхом розведення спондилової глини у воді, перемішування суміші здійснювалось за допомогою механічної мішалки (3). Після баку суспензія за допомогою насоса (6) направлялась у розташований над фільтрувальною колоною витратний бак (8). Постійний рівень води в цьому баку, який забезпечував постійну (задану) витрату води, підтримувався за допомогою окремого переливного трубопроводу (9). З витратного баку суспензія надходила до фільтрувальної колони (12), попередньо проходячи

через розсіювальний пристрій (11). На фільтрування рідина подавалася з постійною витратою, величина якої регулювалася запірною арматурою на подавальному трубопроводі (10). Після проходження фільтруючого шару завантаження (14) очищена вода надходила до дренажу – щілинного ковпачку (18), після чого через відповідний трубопровід (19) відводилась в систему водовідведення, для промивки фільтруючого завантаження використовувався трубопровід (20).

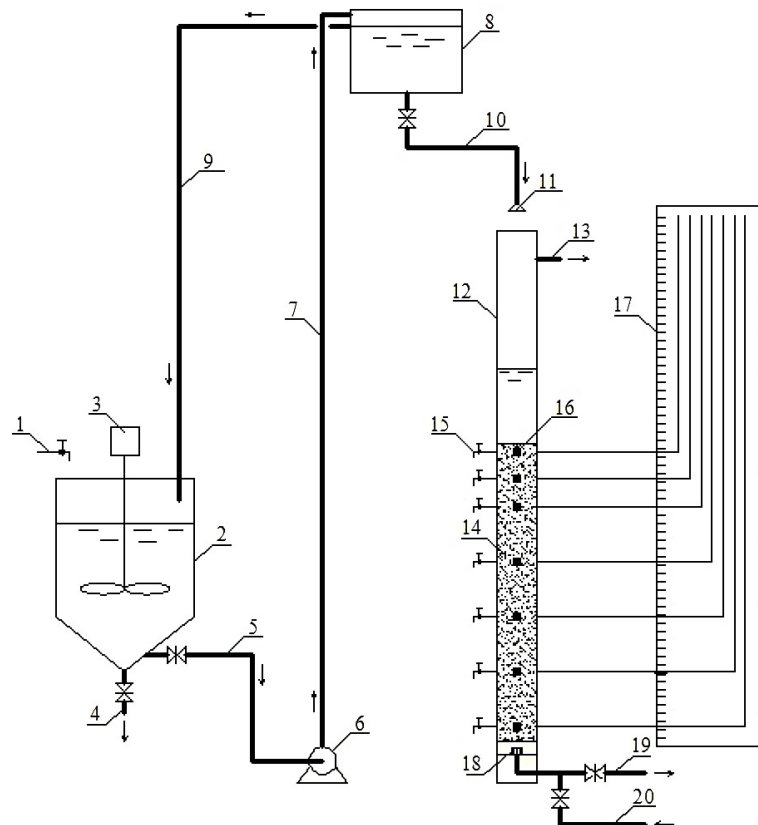


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Фільтрувальна колона була виготовлена з труби ПВХ Ø150 мм висотою 2 м. Верх залишався відкритим, низ герметично закритий. Висота шару завантаження піску (14) становила 1,0 м. На трубі обладнано 7 створів (1, 2, 3 – на відстані 0,1 м, 4, 5, 6, 7 – через 0,2 м), в яких відбувався відбір води, що очищався (15), і проб піску (16) після процесу фільтрування. В цих же створах було підключено спеціальні п'єзометричні трубки (17) для отримання показань напору у відповідних перерізах фільтруючого завантаження.

Вода на очистку надходила у надфільтровий простір фільтру і рухалась через шар фільтруючого завантаження згори до низу. Після закінчення фільтроциклу фільтр промивали. Для цього закривали запірну арматуру на трубопроводі подачі суспензії (10) та відведення очищеної води (19) і відкривали арматуру на трубопроводі промивної води (20). Промивна вода рухалась у зворотному напрямку, тобто знизу вгору, шар фільтруючого

завантаження розширювався і починав “кипіти”, забруднення вимивалися з нього і по переливному трубопроводу (13) виносились в каналізацію.

Дослідження проводились при чотирьох значеннях величини швидкості фільтрування: $V_0 = 4,08$ м/год, $6,93$ м/год, $9,78$ м/год, $13,04$ м/год. Початкова концентрація забруднень в дослідях становила: $C_0 = 50$ мг/дм³, 100 мг/дм³.

Як було визначено раніше пористість чистого піску становила $n_0 = 0,47$. Тоді об’єм осаду, який накопичився в одиниці об’єму завантаження буде Δn . Ця величина називається питомим об’ємом осаду. При цьому пористість фільтруючого матеріалу в даний момент часу визначить зі співвідношення:

$$n = n_0 - \Delta n. \quad (1)$$

Коефіцієнт фільтрації чистого піску в дослідях становив $k_{\phi 0} = 49$ м/год. Обробка отриманих дослідних даних здійснювалась в безрозмірних величинах. При цьому було прийнято: $\bar{k}_\phi = k_\phi / k_{\phi 0}$ – безрозмірний коефіцієнт фільтрації; $\bar{V} = V / V_0$ – безрозмірна швидкість фільтрування; $\bar{n} = n / n_0$ – безрозмірна пористість фільтруючого завантаження. В приведених співвідношеннях параметри k_ϕ , V , n – значення відповідного параметра змінного за величиною.

На рис. 2 представлена, отримана в проведених нами дослідях, експериментальна залежність зміни безрозмірної пористості \bar{n} від безрозмірного коефіцієнта фільтрації завантаження \bar{k}_ϕ , який представляє співвідношення між відомими коефіцієнтами фільтрації чистого і замуленого фільтруючого завантаження.

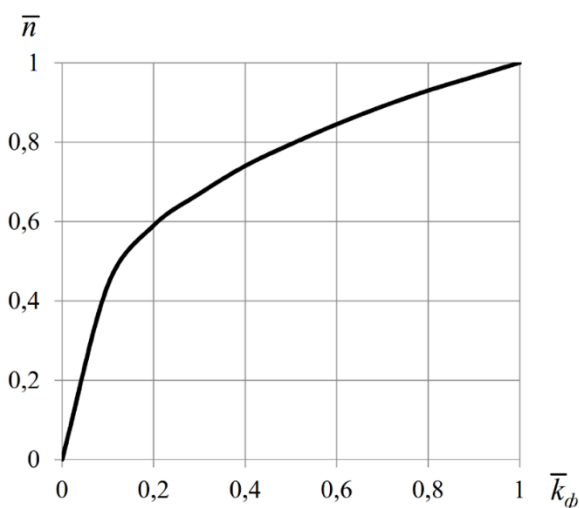


Рис. 2. Зміна пористості в залежності від коефіцієнта фільтрації

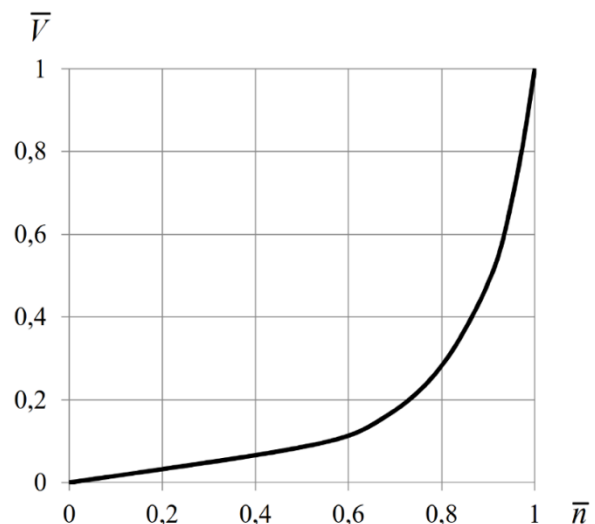


Рис. 3. Зміна безрозмірної швидкості фільтрування від безрозмірної пористості

Аналізуючи представлений графік можна зробити висновок, що меншим значенням відносної пористості завантаження $\Delta \bar{n}$ (зменшення вільного

порового простору завантаження) за рахунок впливу затриманих частинок забруднень, викликає суттєве зменшення відносного коефіцієнта фільтрації зернистого завантаження \bar{k}_ϕ [9]. Дана графічна залежність задовільно описується запропонованою нами залежністю

$$\bar{n} = \sqrt[3]{k}. \quad (2)$$

Даний вираз задовільно корелюється із співвідношенням, яке отримане в досліджах Д.М. Мінца [10].

Важливим результатом проведених дослідів також є експериментальна залежність швидкості фільтрування від величини пористості матеріалу завантаження. Відповідний графік приведено на рис. 3.

Дана залежність підтверджує висновок, що при більшій пористості фільтруючого матеріалу має місце більша швидкість фільтрування. Затримані частинки забруднень зменшують об'єм порового (вільного) простору завантаження, що при пропуску тієї самої витрати призводить до збільшення швидкості фільтрування [11, 12].

Приведена експериментальна залежність може бути задовільно описана формулою виду:

$$\bar{V} = \alpha \bar{n}^b, \quad (3)$$

де α і b – експериментальні коефіцієнти, величина яких залежить від типу фільтруючого завантаження.

Висновки та рекомендації подальшого дослідження. В даній роботі на основі проведених експериментальних досліджень отримана функціональна залежність коефіцієнта фільтрації і швидкості фільтрування від пористості завантаження. Підтверджено висновок, що зі зменшенням пористості фільтруючого завантаження, яке відбувається за рахунок накопичення в ньому частинок забруднень, вказані параметри також суттєво зменшуються. Запропоновано емпіричні залежності для описання розглянутих процесів. В якості подальших досліджень слід рекомендувати визначення приведених в даній роботі співвідношень для інших типів забруднень або використанні іншого фільтруючого завантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ives K.J. Rapid filtration. *Water research*. 1970. Vol. 4, No 3. P. 201–223. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(70\)90068-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(70)90068-0)
2. Журба М.Г. Очистка воды на зернистых фильтрах. Львів: Вища школа, 1980. 200 с.

3. Reddi L., Xiao M., Hajra M.G., Lee I.M. Physical clogging of soil filters under constant flow rate versus constant head. *Canadian Geotechnical Journal*. 2005. Vol. 42, No 3. P. 804–811. <https://doi.org/10.1139/t05-018>
4. Орлов В.О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. Рівне: НУВГП, 2005. 163 с.
5. Amazani A., Maini B. Flow of dispersed particles through porous media – Deep bed filtration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009. Vol. 69, No 1–2. P. 71–88. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.06.016>
6. Polyakov V., Kravchuk A., Kochetov G., Kravchuk O. Clarification of aqueous suspensions with a high content of suspended solids in rapid sand filters. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. No 1. P. 28–45. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00827>
7. Грабовский П.А. Фильтрация воды через зернистый слой с убывающей скоростью. *Доповіді НАН України*. 2016. № 8. С. 40–45. <http://dx.doi.org/10.15407/dopovidi2016.08.040>
8. Поляков В.Л., Кравчук О.А. Математическое моделирование осветления суспензии фильтрованием с существенно переменной скоростью. *Вісник ОДАБА*. 2015. Т. 59. С. 328–334.
9. Кравчук О.А. Дослідження гідравлічного опору завантаження фільтрів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2017. № 27. С. 208–213.
10. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды. М.: Стройиздат, 1964. 156 с.
11. Кравчук О.А. До зміни гідравлічних характеристик зернистого завантаження фільтрів в процесі їх роботи. *Науковий вісник будівництва*. 2016. № 2. С. 316–319.
12. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження зміни швидкості фільтрування під час роботи швидкого фільтра. *Містобудування та територіальне планування*. 2017. № 64. С. 135–141.

к.т.н., доцент **Кравчук А.А.**,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры,

Кравчук О.Я., Национальный транспортный университет

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ОТ ПОРИСТОСТИ ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА СКОРЫХ ФИЛЬТРОВ

В данной работе на базе проведенных авторами экспериментальных исследований определены важные характеристики фильтрующей загрузки

скорых фильтров, такие как коэффициент фильтрации, пористость и скорость фильтрования. Определено соотношение между указанными параметрами, а также характер их изменения как по высоте фильтрующего шара, так и со временем на протяжении работы сооружения. Приведены чертежи и рассмотрены особенности работы разработанного и смонтированного экспериментального стенда, который состоит из фильтрующей колонны, песчаной фильтрующей загрузки с начальной пористостью $n = 0,47$. Измерения проводились при разных начальных скоростях движения воды $V_0 = 4,08$ м/час, 6,93 м/час, 9,78 м/час, 13,04 м/час и концентрациях модельных загрязнений $C_0 = 50$ мг/дм³, 100 мг/дм³. По результатам измерений были получены экспериментальные зависимости и соотношения между основными опытными параметрами. А именно, между пористостью и коэффициентом фильтрации фильтрующего материала, между пористостью и скоростью фильтрования. Проведен анализ в безразмерной форме полученных данных, построены необходимые графики и подобраны соответствующие эмпирические зависимости. Подтвержден эффект уменьшения коэффициента фильтрации зернистого материала и скорости фильтрования при снижении пористости песка. Показано, что на начальных этапах процесса фильтрования заиливание загрузки и скорость фильтрования изменяется не существенно, со временем интенсивность этих процессов растет и достигает своего максимума в конце цикла фильтрования.

Ключевые слова: скорый фильтр; загрузка фильтра; скорость фильтрования; коэффициент фильтрации; пористость; осадок.

Ph.D., Associate Professor **Kravchuk Oleksandr**,
Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine,
Senior Lecturer **Kravchuk Olga**, National Transport University, Ukraine

HYDRAULIC CONDUCTIVITY DEPENDENCE ON POROSITY OF RAPID FILTERS MEDIA

Important characteristics of the rapid filters media, such as hydraulic conductivity, porosity and filtration rate, are determined on the basis of experimental research, conducted by the authors. The relationship between these parameters, as well as the nature of their variation in the height of the filter bed, and over time during the operation of the structure is defined. The scheme of the developed

experimental setup and its operation is presented. It consists of a filter column, sand filter media with initial porosity $n = 0,47$. Measurements were performed at different initial filtration rates $V_0 = 4.08$ m/h, 6.93 m/h, 9.78 m/h, 13.04 m/h and concentrations of model contaminants $C_0 = 50$ mg/dm³, 100 mg/dm³. Experimental dependences and relationships between the main experimental parameters were obtained according to the measurements results. Namely, the relationships between the porosity and the filter media hydraulic conductivity, between the porosity and the filtration rate were received. The analysis of the received data is carried out in the dimensionless form. The necessary graphs are constructed and the corresponding empirical dependences are determined. The effect of the hydraulic conductivity of granular media and filtration rate reduction while reducing the porosity of sand is confirmed. It is shown that filter media siltation and the filtration rate don't change significantly at the initial stages of the filtration process. The intensity of these processes increases over time and reaches its maximum at the end of the filtration cycle.

Key words: rapid filter; filter media; filtration rate; hydraulic conductivity; porosity; sediment.

REFERENCES

1. Ives, K.J., 1970. Rapid filtration. *Water research*, vol. 4, no. 3, pp. 201–223. {in English}. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(70\)90068-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(70)90068-0)
2. Zhurba, M.G., 1980. *Ochistka vody na zernistih filtrah*. Lviv: Vyscha shkola, 200. {in Russian}.
3. Reddi, L., Xiao, M., Hajra, M.G. & Lee, I.M., 2005. Physical clogging of soil filters under constant flow rate versus constant head. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, no. 3, pp. 804–811. {in English}. <https://doi.org/10.1139/t05-018>
4. Orlov, V.O., 2005. *Vodoochysni filtry iz zernystoyu zasypkoyu*. Rivne: NUVGP, 163. {in Russian}.
5. Amazani, A. & Maini, B., 2009. Flow of dispersed particles through porous media – Deep bed filtration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 69, no. 1–2, pp. 71–88. {in English} <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.06.016>
6. Polyakov, V., Kravchuk, A., Kochetov, G. & Kravchuk, O., 2019. Clarification of aqueous suspensions with a high content of suspended solids in rapid sand filters. *EUREKA: Physics and Engineering*, no. 1, pp. 28–45. {in English}. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00827>
7. Grabovskyi, P.A., 2016. Water filtration through a grainy layer with decreasing rate. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 8, pp. 40–45. {in Russian}. <http://dx.doi.org/10.15407/dopovidi2016.08.040>

8. Polyakov, V.L. & Kravchuk, O.A., 2015. Mathematical modeling of suspension clarification under substantially variable velocity. *Bulletin of ODABA*, vol. 59, pp. 328–334. {in Russian}.
9. Kravchuk, O.A., 2017. Investigation of filters medium hydraulic resistance. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, no. 27, pp. 208–213. {in Ukrainian}.
10. Mints, D.M., 1964. *Teoreticheskie osnovyi tehnologi ochistki vody*. Moscow: Sroyizdat, 156. {in Russian}.
11. Kravchuk, O.A., 2016. To the variation of hydraulic characteristics of filters grain medium in the process of their operation. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*, no. 2, pp. 316–319. {in Ukrainian}.
12. Kravchuk, O.A., 2017. Experimental study of filtration rate variation during the rapid filters operation. *Urban Development and Spatial Planning*, no. 64, pp. 135–141. {in Ukrainian}.