

HIDRAULIKA PRANJA FILTERA SA AKTIVNIM UGLJEM U POSTROJENJIMA ZA PREČIŠĆAVANJE VODE

HYDRAULIC OF ACTIVATED CARBON FILTERS WASHING IN WATER TREATMENT PLANTS

Miodrag Stanojević^{*1}, Aleksandar Petković²

¹Eko-Vodo Projekt, Beograd

²Akademija tehničkih strukovnih studija Beograd

Pri pranju brzih gravitacionih filtera vodom dolazi do ekspanzije filterskog medijuma i podizanja nivoa vode iznad filtera kako bi se nečistoće koje su se na njemu zadržale prilikom procesa filtracije, a koje su lakše od materijala medijuma, preko preliva odvele u kanalizaciju. Veličina ekspanzije zavisi od brzine strujanja vode kroz filterski medijum prilikom pranja kao i od viskoznosti vode koja se menja u zavisnosti od njene temperature.

Za filterske medijume kao što su kvarcni pesak ili kombinacija peska i drugih materijala (antracit, tuf, zeoliti i sl.) postoje u literaturi različite metode za određivanje brzina strujanja vode prilikom pranja sloja primenjenog medijuma, koje omogućuju ostvarivanje njegove ekspanzije dovoljne da se uklone nečistoće deponovane tokom procesa filtracije vode.

Međutim, za adsorbicione materijale kao što je granulirani aktivni ugljen, koji se u novije vreme sve češće primenjuje kao završna filtracija pri prečišćavanju vode za piće, još uvek ne postoje formule koje bi pouzdano mogle da daju valjane rezultate izračunavanja brzina pranja ovakvih filtera.

Autor u radu iznosi sopstveni pokušaj za rešavanje ovog problema, oslanjajući se pre svega na praktična iskustva stečena praćenjem 36-godišnjeg rada PPV „Makiš“ u Beogradu, kao i na eksperimentalne krive renomiranih svetskih proizvođača aktivnih ugljeva.

Ključne reči: pranje filtera; fluidizacija; ekspanzija; viskoznost

During backwashing high-speed gravity filters with water, the filter medium expands and the water level above the filter rises, so that the impurities that have accumulated on it during the filtration process, and which are lighter than the material of the medium, are taken to the sewer through the overflow. The size of the expansion depends on the speed of the water flow through the filter medium during washing, as well as on the viscosity of the water, which changes depending on its temperature.

For filter mediums such as quartz sand or a combination of sand and other materials (anthracite, tuff, zeolites, etc.), there are various methods in the literature for determining water flow rates during washing the layer of the applied medium, which enable its expansion sufficient to remove impurities.

* Corresponding author: miodragstanojevic60@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1558-585X>

However, for adsorptive materials such as granulated activated carbon, which has recently been increasingly used as final filtration in the purification of drinking water, there are still no formulas that could reliably give valid results for calculating the washing rates of such filters.

In the paper, the author presents his own attempt to solve this problem, relying first of all on practical experience gained by monitoring the 36-years operation of PPV "Makiš" in Belgrade, as well as on experimental curves of renowned world manufacturers of activated carbons.

Key words: filter backwashing; fluidization; expansion; viscosity

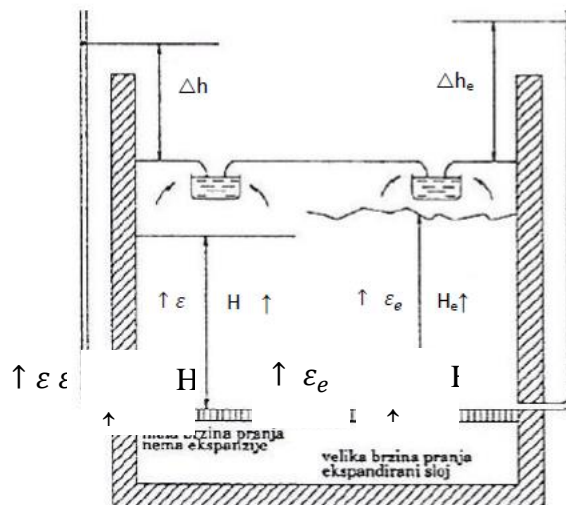
1. Uvod

Za vreme rada filtera u redovnoj eksploataciji, čestice materijala koje sadrži influent se zadržavaju na površini zrna finog medijuma i u porama između zrna. Kontinualnim radom filtera, materijali se uklanjaju iz vode i nagomilavaju se u filterskom sloju smanjujući tako njegovu poroznost. Ovo ima dvostruki uticaj na rad filtera: povećava pad pritiska kroz filter i povećava napone smicanja akumulisanog floka. Eventualno, ukupan hidraulički pad pritiska može dostići ili biti jednak pritisku potrebnom da obezbedi željenu brzinu strujanja kroz filter, ili bi moglo doći do proboja i curenja čestica flokula u efluent filtera. Neposredno pre nego što bi došlo do bilo koje od ove dve pojave, filter bi trebalo isključiti iz pogona i odmah otpočeti proces njegovog pranja u smeru suprotnom od smeru filtracije.

2. Hidraulika pranja filtera

Pri strujanju vode za pranje kroz sloj filterskog medijuma javljaju se hidraulički otpori koji zavise od brzine strujanja, granulacije i poroznosti materijala medijuma, debljine njegovog sloja itd. Da bi se uklonile nečistoće između čestica medijuma potrebno je ostvariti ekspanziju filterskog sloja. S druge strane, veličina dostignute ekspanzije ne sme izazvati odnošenje materijala filterskog medijuma preko preliva zajedno sa prljavom vodom od pranja filtera. To praktično znači da vrednost brzine strujanja vode za pranje filtera mora biti tako određena da omogući fluidizaciju kompletnog sloja medijuma koji učestvuje u filtraciji.

Efikasnost pranja filtera se meri veličinom dostignute ekspanzije sloja medijuma koja se definiše kao (slika 1):



Slika 1. Ekspanzija sloja za vreme pranja filtera

$$E = \frac{H_e - H}{H} \quad (1)$$

gde je:

$E[-]$, procentualno povećanje debljine sloja filterskog medijuma za vreme pranja;

$H[m]$, debljina filterskog sloja;

$H_e[m]$, debljina ekspanziranog filterskog sloja za vreme pranja.

Faktor ekspanzije se uzima veći za manje granulacije filterskog medijuma i obrnuto. U praksi su uobičajene vrednosti ekspanzije do 50% za završnu filtraciju sa finom granulacijom medijuma i 30% za predfiltraciju sa grubljim materijalom medijuma. U novije vreme ide se na još manje vrednosti ekspanzije, kao na primer 15%–20% za granulacije od 0,8mm i 10% za granulacije od 1,2mm.

Prilikom ekspanzije ukupna količina materijala medijuma se ne menja, pa važi relacija:

$$(1 - \varepsilon)H = (1 - \varepsilon_e)H_e \quad (2)$$

odakle sledi:

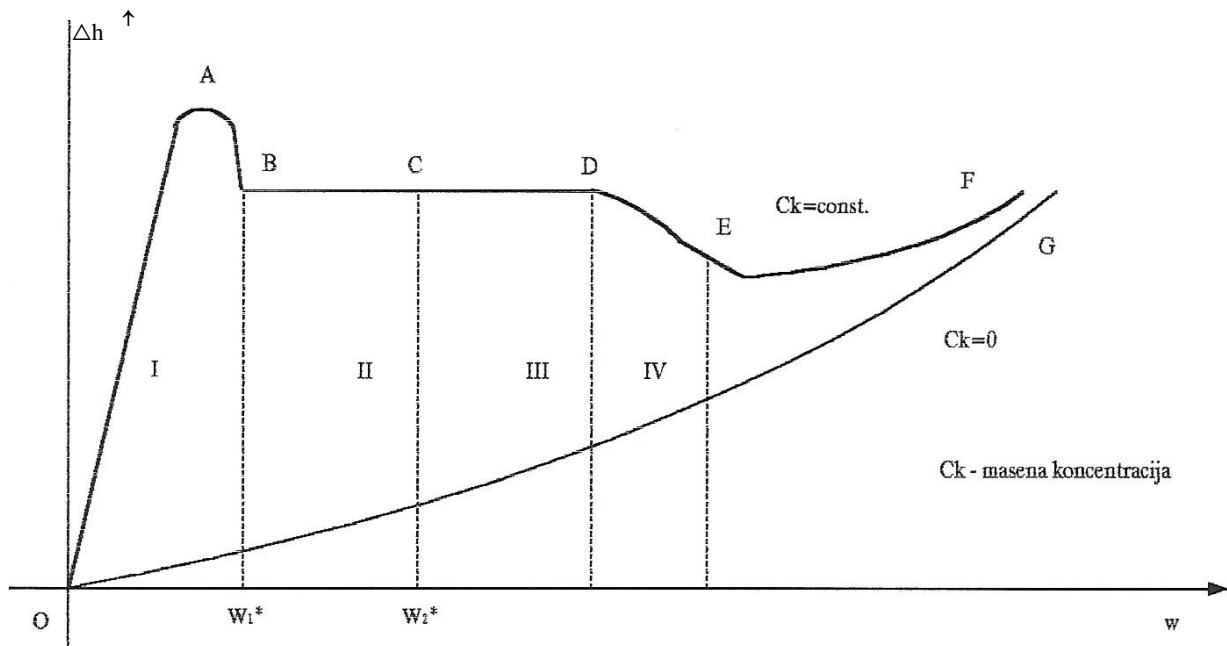
$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon + E}{1 + E} \quad (3)$$

pri čemu je:

$\varepsilon[-]$, poroznost filterskog medijuma u slobodno nasutom stanju;

$\varepsilon_e[-]$, poroznost ekspanziranog filterskog medijuma prilikom pranja.

Eksperimenti vršeni sa različitim filterskim materijalima i različitim vrednostima brzina pranja, kao i eksperimenti sa hidrauličkim transportom tzv. sipkavih materijala, dali su gotovo identične rezultate, koji su prikazani krivama na slici 2.



Slika 2. Fazni dijagram

Kriva OA, koja u izvesnom broju slučajeva može biti i prava linija, budući da su režimi strujanja fluida između čestica filterskog materijala pri malim brzinama uglavnom laminarni, formira se pri strujanju vode kroz materijal u nasutom stanju sa konstantnom poroznošću. U ovakvom režimu strujanja nasuti filterski materijal zauzima istu zapreminu, a otpori strujanja vode između njegovih čestica rastu sa povećanjem brzine sve do tačke A. U tom trenutku dolazi do raskidanja mehaničkih veza između čestica i njihovog postavljanja u pravcu najmanjeg hidrauličkog otpora, što dovodi do smanjenja pada pritiska za vrednost AB. To smanjenje u praksi iznosi 10% do 15% od ukupnog pada

pritiska (OA), zavisno od fizičkih svojstava materijala koji se izlaže fluidizaciji. Daljim povećavanjem brzine strujanja vode vrednost pada pritiska duž strujnog toka više ne raste, ali zato dolazi do povećanja poroznosti između čestica materijala, odnosno do ekspanzije njegovog sloja. Brzina koja odgovara vrednosti u tački A naziva se prvom kritičnom brzinom fluidizacije. Ukoliko se brzina strujanja vode povećava i dalje, povećava se i poroznost između čestica sve do tačke C kada se dostiže najveća visina ekspanziranog fluidizovanog sloja. U tom trenutku najsitnije čestice filterskog materijala počinju da napuštaju korito filtera i zajedno sa vodom preko preliva odlaze u odvodni kolektor. Brzina strujanja pri kojoj dolazi do ovih pojava naziva se drugom kritičnom brzinom fluidizacije. Povećavanje brzine strujanja preko ove vrednosti nije značajno za pranje filtera, već samo za hidraulički transport filterskog materijala radi servisiranja ili eventualne njegove zamene.

Prema tome, područje I faznog dijagrama na slici 2 predstavlja fluidizaciju filterskog materijala u nasutom stanju pri konstantnoj poroznosti ε_I , dok se u području II ovaj materijal potpuno fluidizuje sa poroznošću $\varepsilon_{II} > \varepsilon_I$. Valja samo napomenuti da područje označeno brojem III pripada hidrauličnom transportu istog materijala na bazi fluidizacije sa $\varepsilon_{III} > \varepsilon_{II}$, dok u području IV dolazi do tzv. „letećeg“ transporta potpuno razređenog materijala. Kriva OG odgovara strujanju vode kroz isti protočni presek u kojem nema filterskog materijala.

Na osnovu izloženih definicija nije teško odabrati kriterijume za izračunavanje karakterističnih brzina strujanja vode potrebnih pri pranju filtera.

Kao što je već ranije rečeno, u tački A faznog dijagrama dolazi do raskidanja mehaničkih veza između čestica filterskog materijala, odnosno do njegove fluidizacije pri još uvek konstantnoj poroznosti između čestica čija granulacija odgovara srednjem ekvivalentnom prečniku zrna. Znači da se u tom trenutku vrednost hidrauličkog otpora izjednačila sa težinom filterskog materijala potopljenog u vodi, odnosno da je ostvarena fluidizacija kompletnog sloja, odakle sledi jednakost:

$$\rho_v \times g \times \Delta h = (1 - \varepsilon) \times (\rho_f - \rho_v) \times g \times H \quad (4)$$

ili

$$\Delta h = (1 - \varepsilon) \times \frac{(\rho_f - \rho_v)}{\rho_v} \times H \quad (5)$$

pri čemu je:

Δh [m], pad pritiska kroz filterski sloj za vreme pranja;

ρ_f [kg/m³], masena gustina filterskog materijala;

ρ_v [kg/m³], gustina vode za pranje filtera;

g [m²/s], gravitaciona konstanta.

Iz jednačine (5) se može zaključiti da pad pritiska prilikom pranja brzih gravitacionih filtera zavisi samo od vrste materijala filterskog medijuma (poroznosti i gustine) i visine njegovog sloja, kao i od gustine fluida kojim se filter pere, u ovom slučaju vode.

Ako se iskoristi izraz za poroznost filterskog materijala u slobodno nasutom stanju:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_\varepsilon}{\rho_f} \quad (6)$$

gde je:

ρ_ε [kg/m³], zapreminska gustina filterskog materijala (gustina u slobodno nasutom stanju), jednačina (5) dobija oblik:

$$\Delta h = \rho_\varepsilon \times \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_f} \right) \times H. \quad (7)$$

Pranje filtera sagrađulisanim aktivnim ugljem na PPV „Makiš“ u Beogradu

Postrojenje za prečišćavanje vode za piće (PPV) „Makiš“ u Beogradu, već više od 20 godina u drugom stepenu filtracije vode, kao medijum koristi granulisani aktivni ugalj (GAU) domaćeg proizvođača „Trayal“ iz Kruševca, koji ima sledeće fizičke karakteristike:

- | | | |
|---|-----------------------------------|------------|
| 1. Oblik – zrnasti | | |
| 2. Granulacija odsejavanjem
kroz sistem sita po DIN 4168 | $d > 1,6\text{mm}$ | 1,5 – 2% |
| | $d = 0,425 - 1,6\text{mm}$ | 97 – 98% |
| | $d < 0,425\text{mm}$ | 0,5 – 1% |
| | $d < 0,355\text{mm}$ | 0,1 – 0,2% |
| 3. Srednji prečnik čestice | $d_{sr} = 0,9 - 1,1\text{mm}$ | |
| 4. Gustina sloja u slobodno nasutom stanju
(zapreminska gustina) | $\rho_e = 420 - 460\text{kg/m}^3$ | |
| 5. Gustina čestice uronjene u vodu (masena gustina) | $\rho_f = 1400\text{kg/m}^3$ | |
| 6. Specifična površina | 1200m ² /g | |
| 7. Zapremina mikro pora (po čestici) | 0,45 – 0,50cm ³ /g | |
| 8. Ukupna zapremina pora (u sloju) | 0,8 – 1cm ³ /g | |

Ako se pođe od pretpostavke da je režim strujanja u području I faznog dijagrama (slika 2) laminaran, može se koristiti formula Maksa Leve (*Max Leva*) za izračunavanje prve kritične brzine fluidizacije, koja glasi:

$$w_1^* = 9,23 \times 10^{-3} \times \frac{d^{1,82}}{v^{0,88}} \times \left(\frac{\rho_f}{\rho_v}\right)^{0,94} \quad [\text{m/s}], \quad (8)$$

gde je:

$$v = \frac{497 \times 10^{-6}}{(t+42,5)^{1,5}} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right] \quad (9)$$

kinematička viskoznost, a t [°C], temperatura vode za pranje filtera.

Unošenjem datih podataka u formulu (8), uz pretpostavku da je temperatura vode za pranje $t = 20^\circ\text{C}$, dobiće se da je prva kritična brzina fluidizacije Trayalovog GAU $w_1^* = 0,00028\text{m/s} = 10,35\text{m/h}$. Prethodno je izračunata viskoznost vode koja, za referentnu temperaturu od 20°C , ima vrednost $v = 1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$.

U dosadašnjoj praksi većina poznatih svetskih proizvođača GAU u svojim uputstvima za korišćenje je između ostalog davala i krive za određivanje brzine pranja zaprljanog filtra u zavisnosti od temperature sirove vode i ekspanzije sloja prilikom pranja. Pošto je „Trayal“ relativno novi proizvođač aktivnog uglja za upotrebu u prečišćavanju vode za piće, bar do sada nije bilo dovoljno iskustvenih podataka iz eksploatacije da bi se takve krive mogle stavljati na raspolaganje korisnicima njihovog uglja. S druge strane, kako pri projektovanju postrojenja za prečišćavanje vode tako i pri izboru i nabavci opreme, moraju se što je moguće tačnije odrediti i režimi pranja GAU filtera. Nažalost, u literaturi se ne mogu naći konkretnija uputstva ili formule koje bi se primenjivale za rešavanje ovih problema. U hemijskom inženjerstvu najčešće se pominje *Ergun-Orning* – ova jednačina koja se može koristiti za laminarne i prelazne režime strujanja sa $1 < \text{Re} < 10$ i $5 < \text{Re} < 100$, respektivno. Unošenjem podataka datih u ovom primeru u pomenutu jednačinu dobijaju se vrednosti brzina pranja koje

su veoma daleko od realnih. Ako se pokuša sa *Carman–Kozeny*-jevom formulom, koja se primenjuje za određivanje brzina pranja pešćanih filtera, rezultat je još nepovoljniji.

U takvim okolnostima ovde je učinjen jedan novi pokušaj primenjujući pre svega iskustvene podatke sa PPV „Makiš 1“ i PPV „Jezero“ u Beogradu koji u poslednjih dvadesetak godina koriste Trajalov GAU. Naime, modifikujući prvi deo *Ergun-Orning*-ove jednačine koji se odnosi na laminarne režime strujanja, došlo se do sledećeg izraza za izračunavanje potrebne brzine pranja GAU koja glasi:

$$w = \frac{g}{1000} \times \frac{\varepsilon_e^3 \times d^2}{(1 - \varepsilon_e) \times \nu} \times \frac{\rho_f - \rho_v}{\rho_v} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (10)$$

gde su:

w [m/s], brzina pranja GAU filtera;

ε_e [-], poroznost ekspanziranog filterskog medijuma prilikom pranja;

ρ_f [kg/m³], masena gustina materijala filterskog medijuma;

ρ_v [kg/m³], gustina vode za pranje filtra;

d [m], srednji efektivni prečnik zrna filterskog medijuma;

ν [m²/s], kinematička viskoznost vode za pranje filtra;

g [m/s²], gravitaciona konstanta.

Unošenjem zadatih podataka u formulu (10) sledi:

$$w = \frac{9,81}{1000} \times \frac{0,7582^3 \times (10^{-3})^2}{(1 - 0,7582) \times 10^{-6}} \times \frac{1400 - 1000}{1000} = 0,007 \frac{m}{s} = 25,46 \frac{m}{h}$$

Prethodno je izračunato:

$$\varepsilon = \frac{\rho_f - \rho_v}{\rho_f} = \frac{1400 - 440}{1400} = 0,6857$$

odnosno

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon + E}{1 + E} = \frac{0,6857 + 0,3}{1 + 0,3} = 0,7582$$

kao i kinematička viskoznost vode $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, za temperaturu od 20°C.

Proverom Rejnoldsovog broja:

$$\text{Re} = \frac{w \times d}{\nu} = \frac{0,007 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 7 < 10$$

potvrđuje se da je režim strujanja prilikom pranja GAU filtera laminaran.

Ako se uzme u obzir da temperatura sirove vode, koja se koristi iz reke Save, varira u toku godine od minimalnih 2°C, u zimskom periodu, do maksimalnih 30°C, u toku leta, što za posledicu ima promenu kinematičke viskoznosti vode od $\nu = 1,67 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ do $\nu = 0,805 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, respektivno, za realno moguće vrednosti ekspanzije sloja prilikom pranja GAU filtera (od $E = 0\%$ do $E = 60\%$), posredstvom formule (10) dobiće se odgovarajuće vrednosti brzina pranja koje su prikazane u tabeli 1. i izražene u [m/h].

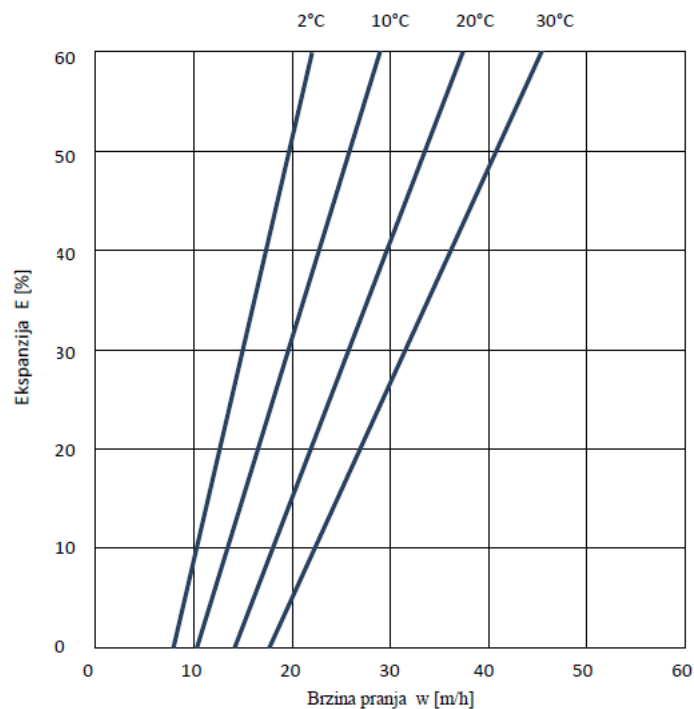
Ovako dobijene vrednosti brzina pranja GAU filtera se veoma dobro slažu sa izmerenim vrednostima u eksploataciji na pomenutim postrojenjima, pa bi se moglo zaključiti da je formula (10), bar za sada, najpodesnija za izračunavanje brzina pranja filtera čiji je medijum granulirani aktivni uglj sa karakteristikama sličnim Trajalovom uglju.

Grafička interpretacija rezultata iz tabele 1 prikazana je na slici 3.

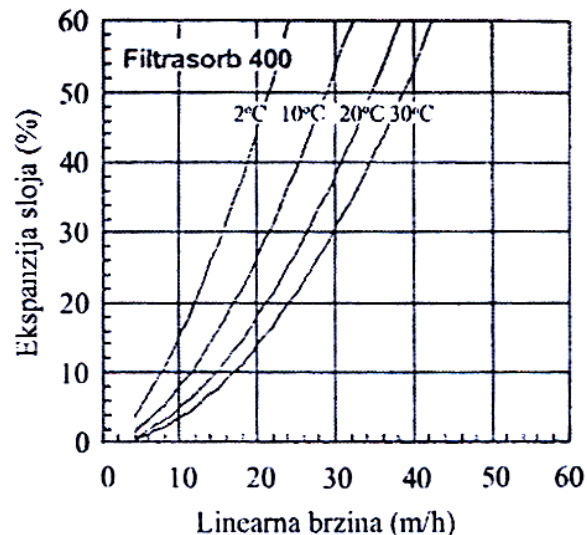
Tabela 1. Brzine pranja GAU filtera računane preko formule (10) za različite vrednosti ekspanzije sloja i temperature vode

Ekspanzija E[%]; poroznost $\epsilon_e[-]$	Temperatura vode t[°C]; kinematička viskoznost vode $\nu[m^2/s]$			
	2°C; $1,67 \times 10^{-6}$	10°C; $1,31 \times 10^{-6}$	20°C; $1,00 \times 10^{-6}$	30°C; $0,805 \times 10^{-6}$
0%; 0,6857	8,64	10,80	14,40	18,00
10%; 0,7145	10,80	13,68	18,00	22,32
20%; 0,7383	12,96	16,20	21,60	26,64
30%; 0,7582	15,24	19,43	25,46	31,63
40%; 0,7757	17,28	22,32	29,16	36,00
50%; 0,7906	19,80	25,20	33,12	41,04
60%; 0,8037	22,32	28,44	37,44	46,40

Takođe, izračunate vrednosti brzina pranja GAU filtera u ovom primeru se skoro poklapaju sa referentnim vrednostima očitanim sa krivih ekspanzije pri povratnom ispiranju datih na slici 4. za ugalj „*Filtrisorb 400*“, čiji je proizvođač firma „*Chemviron*“, a koji ima slične karakteristike Trajalovom uglju. Poklapanja su posebno izražena u područjima vrednosti ekspanzija između 20% i 40%, koje se inače u praksi najčešće primenjuju.



Slika 3. Dijagram zavisnosti brzina pranja GAU filtera od veličine ekspanzije sloja i temperature vode



Slika 4. Eksperimentalne krive ekspanzije pri povratnom ispiranju GAU „Filtrasorb 400“

Ne treba zaboraviti da je u ovom primeru izvršena modifikacija *Ergun-Orning* – ove jednačine samo u njenom prvom delu koji se odnosi isključivo na laminarne režime strujanja ($1 < Re < 10$), dok je njen drugi deo koji važi za prelazne režime ($5 < Re < 100$) i koji se ne može primenjivati u slučajevima pranja GAU filtera ostao neispitan, a koji bi eventualno mogao biti interesantan za neke druge filterske medijume.

3. Zaključak

Ovaj rad je, kao i većina rešavanih problema kroz istoriju razvoja čovečanstva, nastao u iznudici koju nalaže praksa. Da nije bilo projektovanja, izgradnje i iskustava iz tridesetšestogodišnjeg rada, pre svega PPV „Makiš“ u Beogradu, ali i mnogih drugih sličnih postrojenja, koja su izgrađena u poslednjih 40-ak godina, verovatno se ne bi ni pojavio problem koji bi bilo koga motivisao da se bavi problematikom koja je predmet ovog rada. Sa početkom primene aktivnog uglja u prečišćavanju vode za piće, kao adsorpcionog medijuma i potrebe za njegovim periodičnim pranjem i regeneracijom, paralelno se čine i naponi za rešavanje problema izbora režima pranja tako osetljivog i relativno skupog materijala kao što je GAU. Ti naponi su najčešće bili oslonjeni na istraživanja pojedinih autora koji su se bavili pre svega problematikom hidraulike sipkavih materijala u hemijskom inženjerstvu i njihovog transporta u fluidizovanom stanju u rudarstvu i industriji. U takvim okolnostima su se pojavili i radovi poznatih autora kao što su *Carman-Kozeny*, *Ergun-Orning* i drugi, koji datiraju sa kraja 40-ih i početka 50-ih godina prošlog veka, uglavnom bazirani na eksperimentima vršenim sa kolumnama mnogo manjih protočnih preseka u odnosu na površine filtera, kada se aktivni ugalj uglavnom koristio samo u vojnoj i farmaceutskoj industriji, dok do njegove primene u prečišćavanju vode za piće dolazi tek 30-ak godina kasnije.

Tako se i sam autor ovog rada doskoro najviše oslanjao na literaturu koja citira pomenute istraživače, iako su rezultati primene njihovih poznatih formula na GAU filtere bili daleko od zadovoljavajućih. Ipak, koristeći te formule kao dobru polaznu osnovu, uz neophodne korekcije tako dobijenih rezultata i valorizovanja nastalih razlika u odnosu na praktično realizovane vrednosti, uglavnom ustanovljenim praćenjem rada postrojenja koja su već dovoljno dugo u eksploataciji, nastala je i modifikovana formula koja je predmet ovog rada.

4. Literatura

- [1] **Culp G., R. Williams, R. Culp:** *Handbook of Public Water Systems*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA, 1986.
- [2] **Huisman L. Prof. dr. ir.:** *Rapid filtration*, Technische Universiteit Delft, Delft, Holland, 1983.
- [3] **Nalco Chemical Company.:** *The Nalco Water Handbook*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1987.
- [4] **Ondeo-Degremont Company:** *Water Treatment Handbook*, Paris, France, 2001.
- [5] **Stanojević M.:** *Određivanje režima pranja filtera sa aktivnim ugljem na PPV „Makiš-Jezero“*, „Procesna tehnika“ br.3/1999 (str. 178-182), Beograd, Srbija, 1999.
- [6] **Stanojević M.:** *Prečišćavanje vode za piće*, AGM knjiga, Beograd-Zemun, Srbija, 2022.
- [7] **Stanojević M.:** *Tretman pijaće vode*, Građevinska knjiga, Beograd, Srbija, 2009.
- [8] **Šašić M.:** *Transport fluida i čvrstih materijala cevima*, Naučna knjiga, Beograd, Srbija, 1990.
- [9] *** *Chemviron*, Division of Baltimore Aircoil/Chemviron, USA, 1984.
- [10] *** *Trayal*, Prospektni materijal za GAU, Kruševac, Srbija.