

KAVITACIJA KOT ALTERNATIVA ZA ODSTRANJEVANJE BAKTERIJE LEGIONELE – TIHE NEVARNOSTI V VODOVODNIH SISTEMIH

Cavitation as an alternative solution to fight the Legionella Bacteria; an insidious threat to water supply systems

Martin Petkovšek *, Andrej Šarc **, Matevž Dular ***, Brane Širok **** UDK 628.161.2:579.841

Povzetek	Abstract
<p>Zagotavljanje čiste in neoporečne pitne vode je zelo pomembno, prav tako je pomembno doseganje visoke učinkovitosti čiščenja odpadnih vod za ohranjanje čistega okolja. Odstranjevanje bioloških struktur, kot so različne kulture bakterij, pomeni veliko težavo za vodovodne napeljave predvsem v zdravstvenih ustanovah, še posebej veliko nevarnost pa povzroča pojav bakterije legionele. Kot številne druge bakterije so tudi bakterije legionele razširjene povsod v okolju. Z višanjem koncentracij legionele v vodi je tudi večja verjetnost okužbe z njo. Okužba z bakterijo legionele je lahko za ljudi smrtno nevarna. Smrtnost je višja pri bolnikih z oslabiljenim imunskim sistemom, zato so pogoji za varno obratovanje bolnišnic strožji kot pri drugih objektih. Največkrat so za odstranjevanje oziroma uničevanje legionele poznane tehnološke rešitve povezane z uporabo kemičnih sredstev, kar vpliva tako na zdravje ljudi kot tudi na obremenitev okolja, ali pa toplotnih (visokotemperaturnih) šokov, ki so energijsko potratni in obremenjujoči za vodovodne sisteme. Na Fakulteti za strojništvo razvijamo alternativno rešitev, ki bo omogočala uničenje večine bakterij legionel pred vstopom v lokalni del vodovodnega sistema, npr. v bolnišnico. Delovala bo na principu kavitacije, brez dodajanja kemikalij in toplotne obremenitve vode.</p>	<p>Providing clean and safe drinking water is essential to daily life. Achieving high efficiency in wastewater treatment is also very important to keep our environment clean and safe to live. Removing biological structures like different kind of bacteria can be a major problem in medical institutions such as hospitals etc. In particular, the emergence of Legionella in plumbing can cause significant danger. Like many other bacteria, also Legionella is widespread throughout the natural environment, but in higher concentrations it can be a deadly threat especially to people with weakened immune system (e.g. patients in hospitals). For this reason safety conditions for hospitals are more rigorous than for other institutions. There are some technological solutions to remove or kill bacteria of Legionelle, but they mostly work on the principle of adding chemicals, which affects both, human health and the environment, or involve heat (high temperature) shocks, which are energy consuming and burdensome for plumbing systems. New alternative solution is developed at the Faculty of Mechanical Engineering, which will enable the destruction of the majority of the legionella bacteria prior to its entering into the local water supply system, e.g. into the hospital. It will operate on the principle of cavitation, without adding chemicals and with no heat load on the water.</p>

Uvod

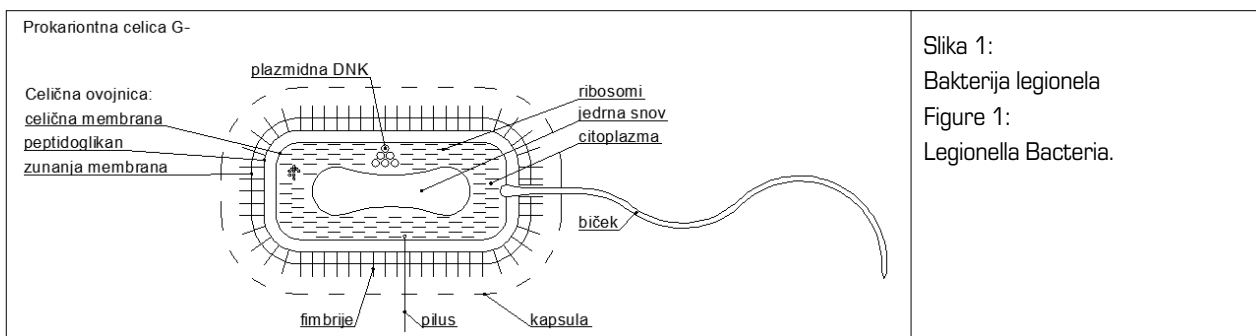
* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, Ljubljana, martin.petkovsek@fs.uni-lj.si

** Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, Ljubljana, andrej.sarc@siol.net

*** dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, Ljubljana, matevz.dular@fs.uni-lj.si

**** dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, Ljubljana, brane.sirok@fs.uni-lj.si

Leta 1976 se je na shodu ameriških vojnih veteranov v Philadelphii pojavila nova, resna oblika pljučnice, ki do takrat ni bila poznana. Ko so bolezen raziskali, so jo poimenovali legionarska bolezen. Povzročila jo je bakterija *Legionella pneumophila*. Pri izbruhu legionarske bolezni v Philadelphii leta 1976 je umrlo 34 (18,7 %) od 182 okuženih ljudi. Posledično je bilo ugotovljeno, da je stopnja umrlji-



Slika 1:
Bakterija legionela
Figure 1:
Legionella Bacteria.

vosti pri hospitaliziranih osebah od 15- do 20-odstotna. Zadnji podatki za ZDA in Avstralijo kažejo, da se je stopnja umrljivosti zmanjšala na približno 14 % pri bolnišničnih okužbah in 5–10 % pri okužbah v urbanih središčih.

Bakterija legionela

Bakterije legionele so bacili, veliki približno 3 μm x 0,8 μm (slika 1), katerih naravno okolje je voda. Genetsko je znanih približno 50 vrst bakterij legionel in 70 seroloških skupin. Od teh je človeku najnevarnejša vrsta *Legionella pneumophila*. Pri okužbah ljudi prevladuje legionela serološke skupine 1 (SG1).

Bakterija legionela je patogena, kar pomeni, da pri gostitelju lahko povzroči bolezen. Po okužbi z legionelo se bolezen lahko razvije v pontiaško vročico ali legionarsko bolezen (legioneloza). Pri pontiaški vročici bolezensko stanje gostitelja lahko traja nekaj dni, stopnja umrljivosti je nič. Legioneloza je težja oblika, pri kateri bolezensko stanje lahko traja do nekaj tednov, stopnja umrljivosti pri pacientih je lahko 40-odstotna. Težavo predstavlja hitro diagnosticiranje bolezni, saj ni očitnih znakov okužbe. Okužbo potrdi bris na mikrobiološke parametre, kar pa zahteva čas, ki je pri zdravljenju zelo dragocen. Stopnja umrljivosti je odvisna od več dejavnikov, kot so resnost bolezni, kako je bila okužba pridobljena, časovni zamik pri diagnozi, od poteka zdravljenja in drugih dejavnikov.

Okužba z bakterijo poteka z vdihavanjem aerosolov (majhnih vodnih kapljic) z vsebnostjo bakterije in je naključna. Z zaužitjem vode se ne moremo okužiti. Za okužbo z legionarsko boleznijo mora biti izpolnjenih več pogojev: naravni rezervoar vode, ustrezne hranilne snovi in temperatura (potrebna za deljenje celic), raztros bakterije (pršenje v zraku), virulenten sev legionele, vstopanje v človeka (na določeno mesto) in občutljivost gostitelja.

Legionelo je mogoče najti tudi v zamrznjenih rekah, ribnikih in vodah v bližini vulkanov. V stavbah je vedno prisotna v vodovodnih in klimatskih sistemih, vodomatih oziroma povsod, kjer so za to ustrezne razmere. Rast in prisotnost bakterij je odvisna od temperature in hranljivih snovi v njenem naravnem okolju oziroma v vodi. Hranljive snovi so zagotovljene z dotokom sveže vode. Ustrezna temperatura za obstoj bakterij je približno do 66 °C, pri temperaturi nad 70 °C je uničena v zelo kratkem času.

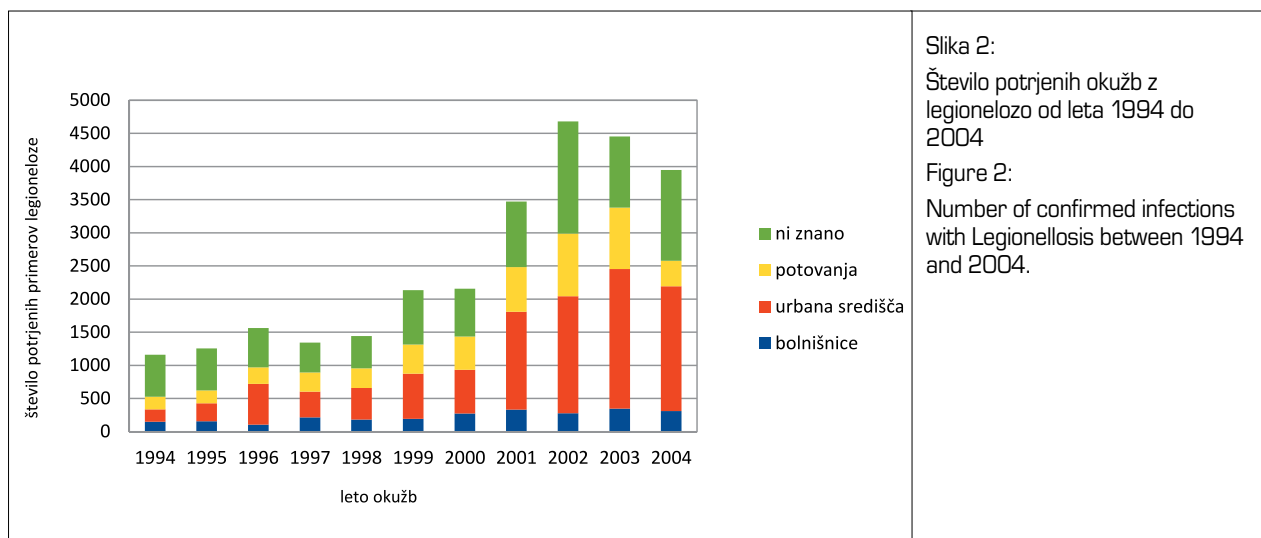
Najugodnejša temperatura, pri kateri se najhitreje množi, je med 32 °C in 42 °C. Pri temperaturah od 44 °C do 45 °C se rast vseh sevov upočasni, pri temperaturi od 48 °C do 50 °C pa se povsem ustavi. Pod 20 °C se ne množi oziroma se množi tako malo, da sprememba ni merljiva (razen v posebnih razmerah). Legionela lahko preživi dolge časovne intervale pri nizkih temperaturah in se ponovno množi, ko temperatura in drugi potrebni dejavniki to omogočajo. Sevi legionele imajo decimalni redukcijski čas od 80 do 124 minut pri 50 °C in 2 minuti pri 60 °C. Prenese pH vrednosti 2,0 na kratke časovne intervale in v naravi lahko preživi v vodi pH vrednosti od 2,7 do 8,3.

Verjetnost okužbe je zelo odvisna od lokacije in izvora vode. Izvor legionele je običajno točno določen element ali sistem, iz katerega se aerosoli širijo v okolico. Vsem so skupni zračni tok in majhne kapljice vode v njem (aerosoli). Mesta okužbe, kjer je verjetnost za okužbo višja kot drugje, so tuši, bazeni, hladilni stolpi, pipe, vlažilci, neposredna bližina vodometa. Objekti, v katerih so pogosto znane višje koncentracije legionele, so hoteli, bolnišnice, križarke in kopališča.

Nevarnost v zdravstvenih ustanovah

V objektih je razmnoževanju legionele najbolj izpostavljen vodovodni sistem. V sistemu so velikokrat izpolnjeni vsi pogoji za hitro deljenje celic. Najpomembnejše so hranljive snovi, ki so zagotovljene z dotokom sveže vode, kar je posledica porabe sanitarne vode (hladne in tople) v objektu. Sveža voda ob vstopu v objekt ima po navadi temperaturo 12–16 °C, kar pomeni, da temperatura ni primerna za delitev celic. Topla voda v zalogovnikih ima po navadi med 55 °C do 60 °C, kar je preveč za množenje bakterij. Temperatura vode se v delih objekta, ki se manj uporabljajo ali so oddaljeni od priprave tople sanitarne vode, počasi izenači s temperaturo okolice (npr. instalacijskega jaška), če ni zagotovljena ustrezna pretočnost omrežja. Temperatura v instalacijskih jaških se lahko povzpne čez 30 °C. Pri tem je izpolnjen pogoj o ustrezni temperaturi za množenje bakterij.

Ustrezen pretok vode v sistemu je ključnega pomena predvsem zaradi dveh parametrov, na katera vpliva.



Slika 2:
Število potrjenih okužb z legionelozo od leta 1994 do 2004

Figure 2:
Number of confirmed infections with Legionellosis between 1994 and 2004.

Če je pretok vode zadosten, se pojavi izpiranje bakterij v okolico, podobno kot pri bioreaktorju, kar pomeni, da bakterije, ki so že v cevi vodovoda, nimajo dovolj časa za množenje. Koncentracije bakterij ostajajo nizke. Ustrezen pretok vode zagotavlja tudi ustrezen temperaturni profil, kar pomeni, da se temperatura vode v odsekih inštalacij nima časa temperaturno izenačiti z okolico. Hladna voda v inštalaciji v tem primeru ne presega 20 °C in temperatura tople vode ne pade pod 50 °C. Na iztočnih mestih blizu vstopa vode v objekt ali blizu priprave tople sanitarne vode to praviloma ni težava. Težave nastopijo pri iztočnih mestih, ki so od vhoda in priprave zelo oddaljeni, saj do tja vodijo dolgi odseki cevi, voda v njih pa se ves čas temperaturno izenačuje z okolico (npr. temperatura v inštalacijskem jašku). Previsoke koncentracije bakterij se lahko pojavijo tudi v zalogovnikih tople vode, v katerih je deljenje bakterij bolj podobno množenju bakterij v zaprtem sistemu. Hitrosti tople sanitarne vode v zalogovnikih so nižje, kar se kaže v razslojenosti vode. To pomeni, da je temperatura vode pri vrhu zalogovnika lahko do 55 °C, na dnu pa 40 °C (če konstrukcija zalogovnika ni temu prilagojena). Če je zalogovnik bistveno predimenzioniran, je izmenjava vode v časovni enoti prenizka in spet so ustvarjeni ustrezni pogoji za množenje bakterij.

V obdobju od leta 1987 do 1998 je bilo v Sloveniji prijavljenih 39 bolnikov z okužbo legionele, od 1996 do 1997 pa so zabeležili tri smrtne primere, povezane s to boleznijo. Leta 1991 je v bolnišnici na Jesenicah zbolelo 17 zdravstvenih delavcev. V zadnjem obdobju podatki kažejo, da je bilo leta 2011 42 potrjenih okužb z bakterijo legionele, leta 2012 jih je bilo 80, januarja in februarja 2013 pa so bili trije potrjeni primeri.

Slika 2 prikazuje število okuženih oseb po posameznih lokacijah. Največ ljudi se je okužilo v urbanih središčih, kamor spadajo nakupovalni centri, restavracije in industrijski centri. Pod okužbe na potovanju spadajo tiste okužbe, kjer se osebe okužijo, ko niso v svojem domačem okolju (okužbe v hotelih, na križarkah). Veliko je tudi primerov, pri katerih se ni z gotovostjo določilo mesta okužbe. Podatki veljajo za EU.

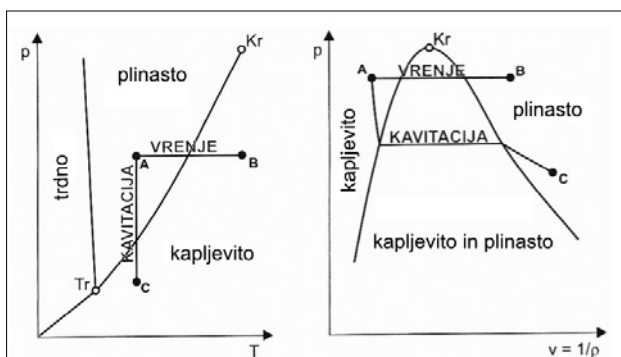
Orodja za odstranjevanje/preprečevanje legionele

V boju proti legioneli je znanih več ukrepov. Med preventivne spada predvsem zagotavljanje zadostnih pretokov v vodovodnem omrežju (znižuje čas vode, ko je ta v omrežju) in zagotavljanje ustreznega temperaturnega profila vode (hladne in tople) po omrežju. Če sistem tega ne zagotavlja, so potrebni bistveni posegi v omrežje, kar pomeni izdaten finančni strošek in tudi izpad v dobavi vode. Toplotni šoki oziroma termična dezinfekcija je učinkovita, če se tudi na izlivnem mestu doseže temperatura dezinfekcije nad 70 °C. Dezinfekcija z visoko temperaturo je zelo učinkovita, vendar zelo draga, hkrati pa je zaradi velikih temperaturnih sprememb obremenjena vodovodna infrastruktura. Na tržišču je veliko sredstev, namenjenih boju proti legioneli, pri čemer se vodi dodajajo kemične snovi (klor itn.). To vpliva na spremembo kemične sestave vode in seveda tudi na kakovost vode.

Nova alternativna možnost, ki se kaže kot razmeroma energijsko varčna, pri čemer ni nobenega dodajanja kemikalij (kakovost vode se ne spremeni) in ni temperaturne obremenitve vode, je fizikalni pojav kavitacija. Pri kavitaciji gre za izključno mehansko obremenitev vode, kjer lokalno ekstremni pogoji povzročijo razpad oziroma poškodbe celic bakterij legionele.

Kavitacija

Kavitacija je fizikalni pojav, ki označuje prehod iz kapljevine v plinasto fazo in nazaj v homogeno kapljevino. Vzrok za nastanek kavitacije je krajevno zmanjšanje tlaka, pri čemer temperatura medija ostane približno nespremenjena. Fizikalno soroden pojav kavitaciji je vrenje. Razlika je le ta, da pri vrenju pride do uparjanja kapljevine pri približno konstantnem tlaku. Oba procesa sta predstavljena v $p - T$ (tlak - temperatura) in $p - v$ (tlak - specifična prostornina) diagramih na sliki 3.



Slika 3: Kavitacija in vrenje
Figure 3: Cavitation and boiling.

Na sliki 3 predstavlja T_r trojno točko, K_r pa kritično točko tekočine. Trojna točka je opredeljena s tlakom in temperaturo, pri kateri lahko vsa tri agregatna stanja snovi so obstajajo v termodinamskem ravnovesju. Kritična točka, ki je opredeljena s temperaturo in tlakom, predstavlja termodinamsko stanje, pri katerem ni mogoče razlikovati med plinastim in kapljevitim agregatnim stanjem snovi.

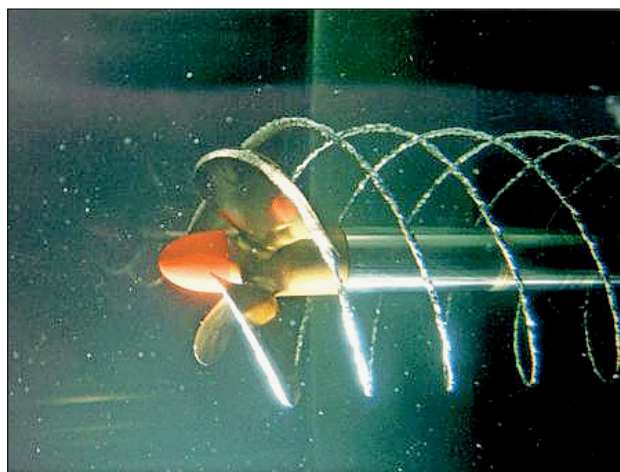
Začetno stanje označuje točka A. Če se premaknemo proti točki B, kapljevina začne vreti in se spremeni v plinasto agregatno stanje, če pa se pomaknemo proti točki C, se kapljevina upari pri konstantni temperaturi, kar predstavlja kavitacijo. Ker pojem kavitacija zajema tudi prehod parne faze v kapljevito, se krog zaključí, ko se tlak po uparjanju vrne na približno začetno stanje.

Pri obeh fizikalnih pojavih pride do izločanja pare in plinov, ki so raztopljeni v kapljevini. Ti plini in pare se izločajo v obliki mehurčkov. Po fazi nastanka in rasti mehurčka nastopi faza implodije oziroma kolapsa mehurčka. To se zgodi zaradi lokalno povišanega tlaka. Parni mehurček implodira sam vase, medtem prazen prostor zapolni okoliška kapljevina, kar povzroči tlačni val. Ti tlačni valovi lahko posredno ali neposredno poškodujejo bližnjo trdno površino (lopatic turbinskih strojev, ventile ali biološke celice).

Kavitacijski mehurček pri svoji rasti, pri uparjanju, pobira energijo iz okoliške kapljevine, ki se lahko sprosti na dva načina. Prvi je tvorjenje mikrocurka, ta nastane pri nesimetričnem kolapsu kavitacijskega mehurčka v bližini trdne površine, drugi način pa je tvorba tlačnega vala pri simetričnem kolapsu, stran od površine. Vodni mikrocurk lahko doseže hitrosti velikostnega reda 100 m/s, tlačni val pri simetričnem kolapsu pa lahko doseže vrednosti več 100 bar. Znano je tudi, da pri kolapsu kavitacijskih struktur nastajajo zelo visoke temperature, do nekaj 1000 K, ki pa trajajo zelo kratek čas. Že v 1 μ s temperatura pade na temperaturo okoliške kapljevine. Ti ekstremni pogoji lahko poškodujejo biološke celice ali pa pri vodni molekuli povzročijo, da disociira na $\cdot\text{OH}$ in $\cdot\text{H}$ radikale.

Glede na nastanek ločimo dve vrsti kavitacije:

1. hidrodinamična kavitacija – povzroči jo geometrija obtekaajočega telesa (profil, lopatica rotorja, propeler);



Slika 4: Primer kavitacije na ladijskem vijaku
Figure 4: An example of cavitation on a ship propeller.

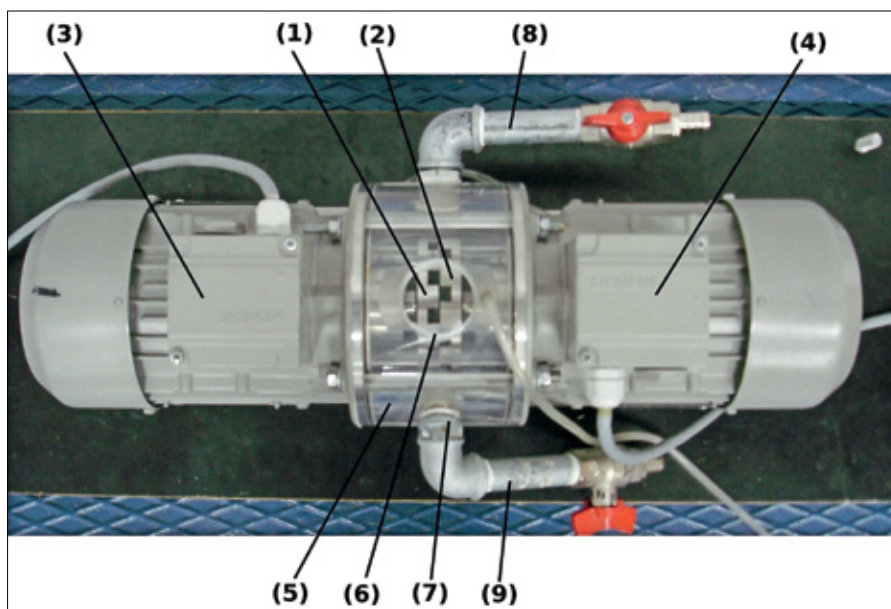
2. akustična kavitacija – povzročijo jo zvočni valovi, ki se širijo po tekočini.

Slika 4 prikazuje tipični primer kavitacije na ladijskem vijaku. Geometrija in relativna hitrost lopatic vijaka povzročata lokalno področje nizkega tlaka, kar je razlog za uparjanje tekočine – kavitacije.

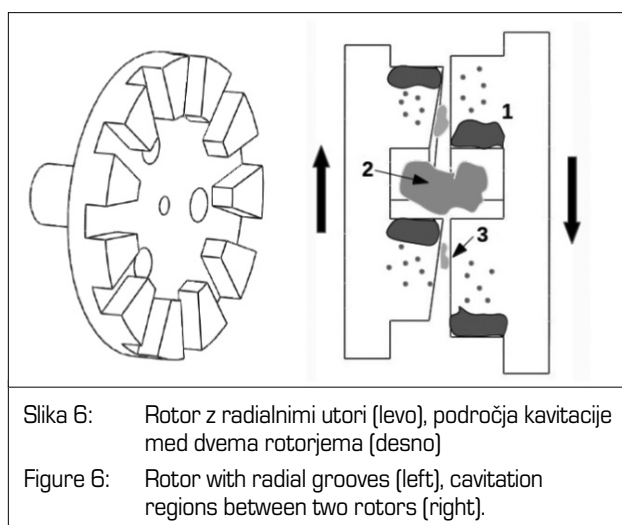
Rotacijski generator hidrodinamske kavitacije

Za potrebe raziskovanja odstranjevanja legionele in čiščenja odpadnih voda s pomočjo hidrodinamske kavitacije smo v Laboratoriju za vodne in turbinske stroje na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani izdelali poseben rotacijski generator hidrodinamske kavitacije, ki je prikazan na sliki 5. Glavna dela kavitacijskega generatorja sta dva soosno postavljena rotorja (1) in (2), ki se vrtita v nasprotnih smereh. Gnana sta vsak s svojim elektromotorjem (3) in (4). Rotorja imata posebej izdelane radialne utore, ki so vzrok za lokalno znižanje tlaka in posledično za uparjanje tekočine. Rotorja se vrtita z 2800 obrati na minuto, kar pri premeru rotorja 90 mm pomeni obodno hitrost do 26 m/s. Reža med čelnima površinama rotorjev znaša približno 0,6 mm. Vizualizacijo s hitro kamero, pogled v dogajanje med rotorjema, omogoča ohišje stroja, izdelano iz prosojnega pleksi stekla (5). Na vrhu ohišja je dodatno vstavljen prozoren valj (6) za kakovostnejši zajem slik. V ohišju je tudi izvrtina (7), ki omogoča vgradnjo hidrofona (visokofrekvenčno tlačno zaznavalo). Pretočnost stroja je zagotovljena z vtokom in iztokom (8) in (9).

Skica rotorja in shema kavitacijskih področij med dvema rotorjema je prikazana na sliki 6. Pri vrtenju rotorjev se zaradi visoke obodne hitrosti na robu zob konstantno pojavlja področje nizkega tlaka, kar ima za posledico pritrdjeno, stalno prisotno kavitacijo s posameznimi mehurčki (1). Pri vsakem srečanju nasproti ležečih utorov se lokalno pojavlja področje nizkega tlaka, kar posledično pomeni



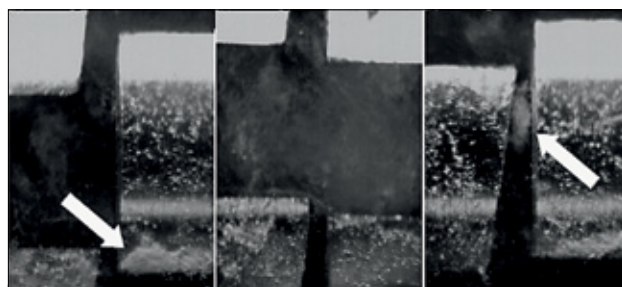
Slika 5:
Rotacijski generator
hidrodinamske kavitacije
Figure 5:
Rotation generator of
hydrodynamic cavitation.



Slika 6: Rotor z radialnimi utori (levo), področja kavitacije med dvema rotorjema (desno)
Figure 6: Rotor with radial grooves (left), cavitation regions between two rotors (right).

uparjanje tekočine, ki se kaže kot kavitacijski oblak [2]. Tretje področje kavitacije je v klinastem medprostoru med nasprotni ležečima rotorjema [3], ki s svojo geometrijo oblikujeta t. i. venturi šobo. Venturi šoba je zožitev, v kateri pride do pospešitve toka in posledično do zmanjšanja tlaka.

Opisana področja kavitacije so prikaza na sliki 7, leva slika prikazuje pritrjeno kavitacijo na zunanjem robu zoba rotorja, srednja slika prikazuje kavitacijo med dvema uto-



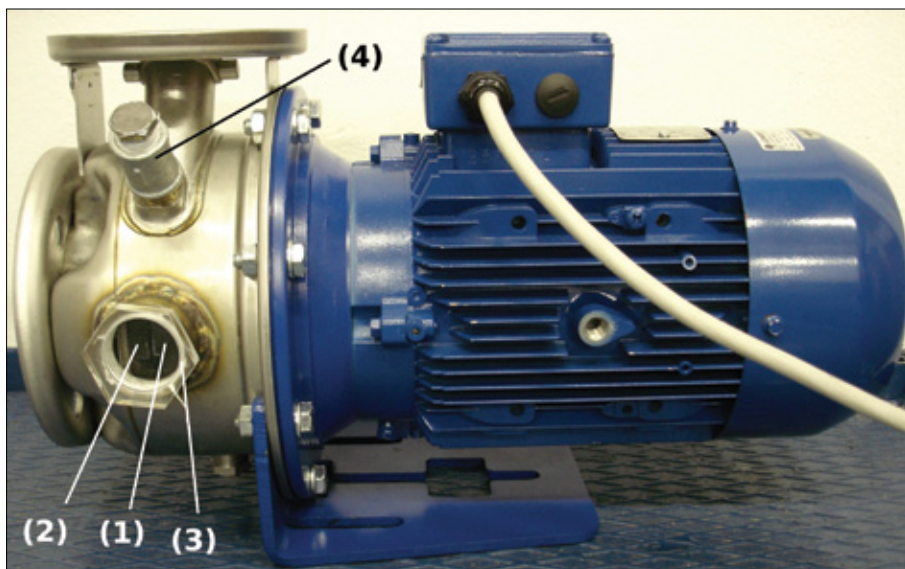
Slika 7: Kavitacija med dvema rotorjema
Figure 7: Cavitation between two rotors.

roma, pri čemer se tvori kavitacijski oblak, desna slika pa prikazuje kavitacijo v reži med čelnima površinama rotorjev, ki oblikujeta geometrijo venturi šobe. Slike so bile zajete s hitro kamero, ki je pri dani resoluciji omogočala snemanje s hitrostjo 8000 slik na sekundo.

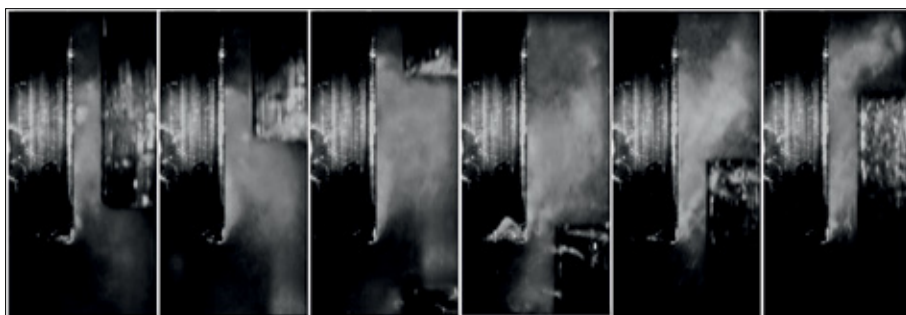
Na podlagi pridobljenega znanja in izkušenj iz meritev na prvem kavitacijskem generatorju (slika 5) je bil izdelan prototipni rotacijski generator hidrodinamske kavitacije (slika 8), ki je pripravljen za montažo na enega izmed objektov. Prototip ima v primerjavi s prejšnjim generatorjem kavitacije en rotor [1] in en stator [2], pri čemer se zaradi večjega premera rotorja dosega enake oziroma večje relativne hitrosti med rotorjem in statorjem kot pri prejšnjem primeru med dvema rotorjema. Tako kot prejšnji rotacijski generator kavitacije ima novi prototipni kavitacijski generator omogočen dostop za merjenje tlačnih pulzacij [3] s hidrofonom in tudi okno za vizualizacijo [4] s hitro kamero. Hidrodinamska analiza obeh strojev je pokazala, da novi kavitacijski generator ustvarja agresivnejšo in obsežnejšo kavitacijo kot prvi. Na sliki 9 je prikazana vizualizacija kavitacije v novem kavitacijskem generatorju.

Sklepne misli

V dosedanjih raziskavah se je kavitacija pokazala kot ustrezno orodje za uničevanje različnih bioloških struktur, tudi bakterije legionele. Opravljenih je bilo več poskusov, s katerimi smo dokazovali učinkovitost kavitacije na razgradnjo legionele. V prvi fazi smo poskusili z ultrazvočnim generatorjem kavitacije, pri čemer se je koncentracija legionele v določenih razmerah znižala na 70 odstotkov. Koncentracija legionele se meri v enotah cfu/L, pri čemer cfu (angl. colony forming unit) predstavlja enoto celic, ki se lahko delijo v 1 l vode. V drugi fazi smo testirali s hidrodinamsko kavitacijo, končne vrednosti so bile približno 75 % začetne vrednosti. Zgornji rezultati so bili doseženi



Slika 8:
Prototipni rotacijski generator
hidrodinamske kavitacije
Figure 8:
Prototype of a rotation generator
of hydrodynamic cavitation.



Slika 9:
Kavitacija v prototipnem
generatorju kavitacije
Figure 9:
Cavitation in a prototype
cavitation generator.

v začetni fazi razvoja in niso najbolj primerni za aplikacijo v neki delujoči sistem, zato smo poskušali izdelati napravo, ki bi povečala intenzivnost kavitacije. Rezultat je rotacijski generator hidrodinamske kavitacije. S pomočjo predstavljenega prototipskega rotacijskega generatorja hidrodinamske kavitacije bi lahko zagotovili neprestano višjo kakovost vode v potencialno ogroženih institucijah (npr. bolnišnice, zdravstveni domovi) z minimalnim posegom v vodovodni sistem in razmeroma majhnimi obratovalnimi stroški v primerjavi z dosedanja prakso razkuževanja vodovodnega sistema s toplotnimi šoki.

Viri in literatura

1. Madigan Michael, T., 2010. Brock biology of microorganisms 13th ed., Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings, 1301 Sansome Street, San Francisco, CA.
2. WHO, 2007. Legionella and the prevention of legionellosis, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, WHO Press, World Health Organization, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland.
3. Internet: <http://www.ivz.si/enboz> (10. 4. 2013).
4. Širok, B., Dular, M., Stoffel, B., 2006. Kavitacija. Ljubljana, založba i2.
5. Franc, J. P., Michel, J. M., 2004. Fundamentals of cavitation. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
6. Fujikawa, S., Akamatsu, T., 1980. Effects of the non-equilibrium condensation of vapor on the pressure wave produced by the collapse of the bubble in a liquid. Journal of Fluid Mechanics, 97, 481 – 512.