

(106) važna je kad iz bilo kojih razloga reakcijsku entalpiju nije moguće odrediti izravno kalorimetrijski.

LIT.: E. A. Guggenheim, Thermodynamics. North-Holland, Amsterdam 1967. — M. L. McGlashan, Chemical Thermodynamics. Academic Press, London 1979. — IUPAC Manual of Symbols and Terminology of Physicochemical Quantities and Units. Pergamon, Oxford 1979. — V. Simeon, Termodynamika. Školska knjiga, Zagreb 1980.

V. Simeon

OTPADNE VODE, upotrijebljene vode u naseljima i industriji, kojima su fizikalna, kemijska i biološka svojstva tako promijenjena da se bez preradbe ne mogu iskoristiti u poljoprivredi, a ni u druge svrhe, pa ni onda kad nije potreba čista voda. Svojstva otpadnih voda razlikuju se prema porijeklu, pa se mogu svrstati u kućanske, industrijske i poljoprivredne otpadne vode.

Kućanske otpadne vode nastaju u seoskim i gradskim naseljima. To su vode iskorištene u kućanstvima, ugostiteljstvu, zdravstvu, školstvu, uslužnim i drugim neproizvodnim djelatnostima. Otpadne vode iz turističkih naselja istih su svojstava kao i kućanske otpadne vode.

Biološka razgradljivost temeljno je svojstvo kućanskih otpadnih voda. Kućanske otpadne vode sadrže organske tvari koje se počinju razgrađivati čim dospiju u vodu, pa se prema stupnju biološke razgradnje razlikuju: a) svježe otpadne vode u kojima biološka razgradnja još nije uznapredovala. Koncentracija otopljenog kisika nije bitno manja od one u vodi iz vodovoda; b) odstajale vode ne sadrže kisik, jer je potrošen za biološku razgradnju otpadne tvari; c) trule (septičke) vode u kojima je biološka razgradnja toliko napredovala da se odvija anaerobno, a ušpostavljena je ravnoteža između razgrađivača i organskih tvari.

Sastav otpadne tvari u kućanskim vodama ovisi o mnogim činiocima, a posebno o načinu života, klimatskim prilikama, izgrađenosti vodoopskrbnog podsustava i raspoloživim količinama vode. Najčešće se kao pokazatelji svojstava kućanskih otpadnih voda upotrebljavaju: biokemijska potrošnja kisika, količina suspendirane tvari i sadržaj mikroorganizama fekalnog porijekla (tabl. 1).

Tablica 1

DNEVNO OPTEREĆENJE OTPADNOM TVARI KUĆANSKIH OTPADNIH VODA PO STANOVNIKU

Zemlja	Biokemijska potrošnja kisika (BPK-5) g	Količina suspendirane tvari g
Francuska	60...80	70
Italija	60...70	70...80
Švicarska	75	100
Kanada, SAD	80...100	100...120

Pokazatelj petodnevna biokemijska potrošnja kisika (BPK-5) ne označuje ukupnu potrošnju kisika za razgradnju organskih tvari. Brže i točnije mjeri se količina organske tvari pomoću pokazatelja kemijska potrošnja kisika (KPK) i ukupni organski ugljik (UOU). Za nepročišćene tipične kućanske otpadne vode omjer BPK-5/KPK iznosi 0,4...0,8, a omjer BPK-5/UOU 1,0...1,6.

Organska biološki razgradljiva tvar u kućanskim otpadnim vodama sadrži 40...60% proteina, 25...50% ugljikohidrata i ~10% lipida.

U kućanskim otpadnim vodama ima mnogo mikroorganizama, naročito bakterija i virusa. Broj i vrsta patogenih mikroorganizama ovise o sanitarnim prilikama područja s kojeg dojetjeu otpadne vode. Budući da je sve patogene mikroorganizme teško utvrditi u otpadnoj vodi, kao indikatori služe koliformni organizmi i fekalni koliformi. Broj koliformnih bakterija (b.c.) koje se dnevno izlučuju po stanovniku iznosi $2,5 \cdot 10^{10} \dots 2,5 \cdot 10^{12}$.

Temperatura je kućanskih otpadnih voda viša od vode iz vodovoda zbog grijanja vode u kuhinjama, kupaonicama i pralionicama. Srednja godišnja temperatura kućanske otpadne vode iznosi $11,5 \dots 20,5^{\circ}\text{C}$.

Kućanske otpadne vode neugledna su izgleda, boje i mirisa, što u estetskom pogledu predstavlja dodatno onečišćenje prijamnika takvih voda.

Industrijske otpadne vode nastaju upotreboom vode u tehnološkim postupcima i u proizvodnji energije. Upotrijebljene vode u sanitarnim uređajima u industriji istih su svojstava kao i kućanske otpadne vode.

Sastav i koncentracija industrijskih otpadnih voda ovise o primijenjenom tehnološkom postupku i ne mogu se uspoređivati pomoću zajedničkih pokazatelja. Industrijske otpadne vode mogu se svrstati u dvije temeljne grupe: a) biološki razgradljive ili kompatibilne, koje se smiju miješati s kućanskim otpadnim vodama; b) biološki nerazgradljive ili inkompatibilne, koje se ne smiju miješati s kućanskim otpadnim vodama bez pretodnog čišćenja.

Industrijske otpadne vode mogu sadržati: teške metale, kiseline, baze, mineralne soli, biocide, mineralna ulja i ugljikovodike, fenol i aromatske organske spojeve, radioaktivne tvari i sintetske kemijske proizvode, što ih ne sadrže prirodne vode, te patogene mikroorganizme.

Prethodno čišćenje industrijskih otpadnih voda potrebno je zbog kontrole otrovnih (toksičnih), postojanih (perzistentnih) tvari i onih koje se gomilaju u živim organizmima. Pročišćivanje industrijskih voda potrebno je i radi izdvajanja eksplozivnih, zapaljivih i korozivnih tvari koje oštećuju kanalizacijske cijevi i uređaje.

Velik dio vode u industriji upotrebljava se kao rashladno sredstvo u izmjenjivačima topline (petrokemijska industrija, termoelektrane, nuklearne elektrane). Zbog povišenja temperature dio rashladne vode ispari, pa se povećava koncentracija soli u vodi. Industrijske otpadne vode s povišenom temperaturom poseban su tip onečišćivača.

Industrijske otpadne vode koje se smiju miješati s kućanskim otpadnim vodama često sadrže tvari koje zbog svojih svojstava ili koncentracija ometaju biokemijsku razgradnju. Opterećenje organskom tvari ne može se potpuno izraziti biokemijskom potrošnjom kisika (BPK), pa se upotrebljavaju sljedeći pokazatelji: kemijska potrošnja kisika (KPK), ukupan organski ugljik (UOU) i ukupna potrošnja kisika (UPK).

Poljoprivredne otpadne vode su procjedne i površinske vode sa zemljišta na kojem se primjenjuju agrotehnički postupci.

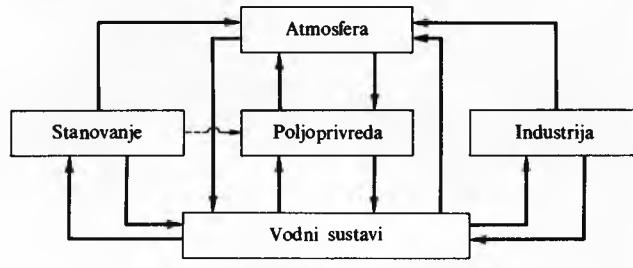
U intenzivnoj poljoprivredi, pogotovo u područjima s nepovoljnom raspodjelom oborina tijekom godine, natapaju se poljoprivredne površine. Višak vode koji se procjeđuje do podzemne vode, odnosno otjeće do površinskih voda razlikuje se prema sastavu od vode za natapanje. Sastav se mijenja zbog isparivanja vode i otapanja umjetnih gnojiva, sredstava za zaštitu biljaka i drugih sastojaka tla kroz koje voda prolazi. Ponovnom upotreboom vode za natapanje višestruko se povećava koncentracija soli u otpadnoj vodi. Karakteristični su pokazatelji sastava poljoprivrednih otpadnih voda kemijska potrošnja kisika (KPK), tvrdća vode, sadržaj fosfora, nitrata i pesticida.

UTJECAJ NA OKOLIŠ

Otpadne vode su prijenosnik otpadnih tvari i topline što dospijevaju u vodu djelovanjem životnih i tehnoloških procesa. Tvari i toplina u otpadnim vodama djeluju na okoliš vrlo različito, već prema svojstvima otpadnih voda i količini otpadnih tvari. Pojedine tvari, kao hranjive soli u malim količinama, djeluju povoljno, dok veće koncentracije mogu uzrokovati neželjene poremećaje ekološkog sustava. Ispuštanje u okoliš nekih teških metalja (živa, krom, kadmij) ili cijanida već u malim količinama može djelovati otrovno na živi svijet. Otpadne se vode ispuštaju, odnosno vraćaju u prirodne i umjetne vodne sustave (sl. 1), pa je potrebno poznavati utjecaj otpadnih voda na ekološke sustave hidrosfere.

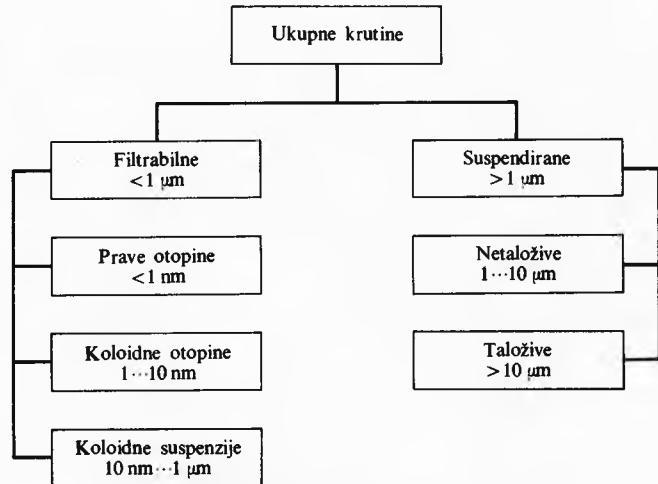
Površinski onečišćivači jesu krupni otpaci (papir, krpe, plastični otpaci, kore od voća) te ulja i masti (nafta i naftni

derivati posebna su grupa površinskih onečišćivača). To su najneugodniji onečišćivači u estetskom pogledu. Krupni površinski onečišćivači nosioci su kolonija mikroorganizama, među kojima može biti i patogenih. Krupne tvari organskog porijekla troše kisik za svoju razgradnju, pa se tako smanjuje količina otopljenog kisika u vodi. Međutim, s obzirom na otopljene, koloidne i suspendirane organske tvari, krupni površinski onečišćivači nemaju većeg ekološkog značenja. Masti i ulja organskog porijekla u vodi reagiraju s bazama stvarajući sapune. Veće količine masnoća mogu ometati biološke procese, uzrokovati neugodnosti pri održavanju kanala i uređaja za čišćenje te u vodi prijamnika stvoriti neprozirne prevlake. Mineralna ulja teško se razgradjuju.



Sl. 1. Shematski prikaz kruženja voda

Krutine organskog i anorganskog (mineralnog) porijekla nalaze se u otpadnim vodama u otopljenom, koloidnom i suspendiranom stanju (sl. 2). Otopljene i koloidne tvari mogu prouzročiti promjenu boje, što je pokazatelj onečišćenja u estetskom pogledu, ali i vrlo ozbiljnih promjena ekološkog sustava. Koloidi i suspendirane tvari tvore mrežu u vodi. Povećana količina vode sprečava prodiranje svjetlosti, što usporuje fotosintezu. Zbog toga se smanjuje količina kisika u većim dubinama, pa se povećava zona anaerobne razgradnje. Suspendirane taložive čestice gomilaju se u blizini ušća kanala. Istaložene čestice mogu uzrokovati neželjene promjene bentoskih životnih zajednica. Anaerobnom razgradnjom organske tvari stvaraju se plinovi neugodna mirisa, a djelovanjem tako nastalih plinova mogu isplivati pahuljice mulja. Miris u vodi najčešće nastaje anaerobnom razgradnjom, ali može potjecati i od unošenja nekih kemijskih spojeva, pogotovo kad se uvode industrijske otpadne vode.



Sl. 2. Shematski prikaz krutina u otpadnim vodama

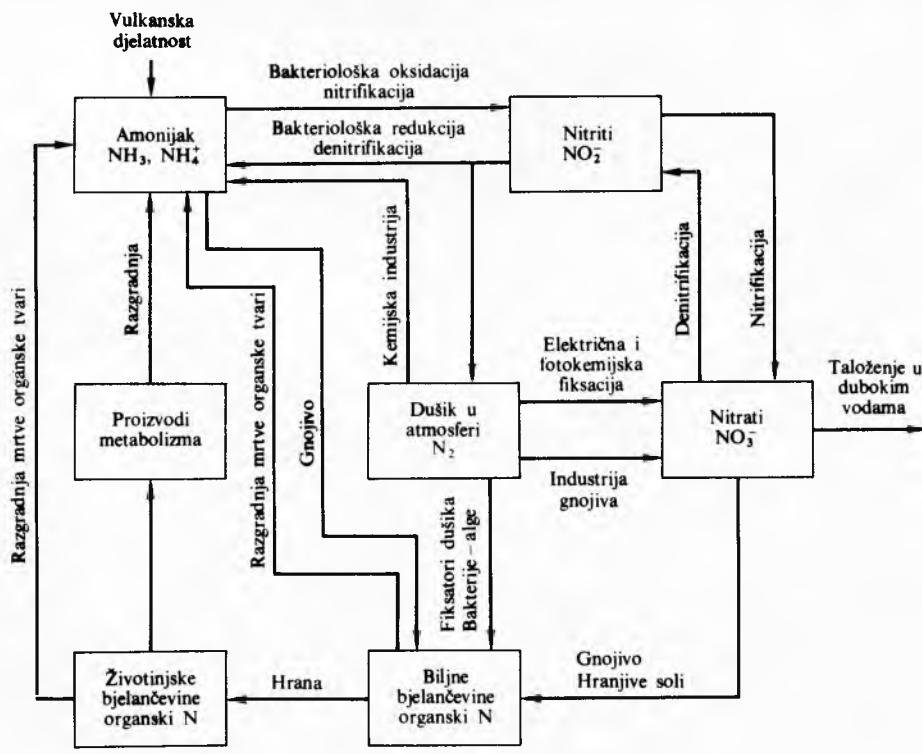
Temperatura vode važan je ekološki činilac za održavanje životnih procesa, a posebno onih organizama koji ne posjeduju vlastiti mehanizam termoregulacije.

Ispuštanjem rashladnih voda iz industrijskih postrojenja termoelektrana i nuklearnih elektrana povišuje se temperatura vode. Toplja voda sadrži manju količinu otopljenog kisika (tabl. 2). Povišenje temperature ubrzava metabolizam živih organizama te se kisik brže troši, pa se pojavljuje sve veći manjak kisika. Zbog toga se mijenjaju životni uvjeti staništa, iščezavaju organizmi koji trebaju više kisika i počinje anaerobna razgradnja mrtve organske tvari.

Tablica 2
TOPLJIVOST KISIKA U VODI

Temperatura, °C	0	5	10	15	20	25	30
Topljivost, mg/L	14,62	12,80	11,33	10,15	9,17	8,38	7,63

Hranjive soli (biogene soli) potrebne su za razvoj fitoplanktona i zelenih biljaka. Dušik je veoma važan za stvaranje bjelančevina. Velike količine hranjivih soli donose u prirodne



Sl. 3. Duškov biokemijski ciklus

i umjetne prijamnike kućanske, industrijske i poljoprivredne otpadne vode. Prirodne se vode obogaćuju solima dušika i fosfora razgradnjom organske tvari. Povećana proizvodnja fitoplanktona u vodnim sustavima sa slabijom izmjenom vode (jezera, akumulacije, zaljevi) može uzrokovati pojavu *eutrofogn stanja* uz cvatnju otrovnih algi, ako su i ostali činioци razvoja povoljni (svjetlost, temperatura). Umjereno povećana proizvodnja biomase općenito je korisna za razvoj ribarstva, ali je neprikladna za vode namijenjene rekreaciji.

U vodnim sustavima u kojima postoji dovoljna količina otopljenog kisika mrtva se organska tvar razgrađuje aerobno, a dušik se pojavljuje u spojevima od amonijaka preko nitrita do nitrata (sl. 3). U takvim vodama amonijak pokazuje na svježe onečišćenje, nitriti na nešto starije, a nitrati su pokazatelj davnog onečišćenja organskom tvari. U dubokim podzemnim vodama nitriti i nitrati mogu biti geološko-kemijskog porijekla. Znatne količine nitrata dospijevaju u podzemne vode poljoprivrednim otpadnim vodama. Ako se takve podzemne vode upotrebljavaju za vodoopskrbu stanovništva, mogu uzrokovati *methemoglobinemiju*, koja je naročito opasna za malu djecu (*plavo dijete*).

Fosfor se u vodama uglavnom nalazi u obliku fosfata. Elementarni fosfor vrlo je otrovan za ribe.

Postojane tvari su organske ili sintetske biološki nerazgradljive ili teško razgradljive tvari. U kraćem vremenskom razdoblju, dok traje njihova razgradnja, nepovoljno djeluju na živi svijet vodnog sustava, a mogu se i gomilati u organizmima.

Postojane tvari koje se dovode otpadnim vodama jesu: nafta i naftni derivati, pesticidi, nerazgradljivi detergenti i druge površinski aktivne tvari, plastične tvari.

Nafta i naftni derivati dospijevaju u vodne sustave s kućanskim i industrijskim otpadnim vodama. Mineralna ulja na vodnoj površini stvaraju tanku prevlaku što umanjuje mogućnost iskorištenja vode za rekreaciju. U toplim oblastima Zemlje mineralna su ulja biološki razgradljiva, a u vrlo hladnim predjelima razgradnja je vrlo spora. Ulja visoke viskoznosti teško se biološki razgrađuju. Za potpunu oksidaciju 1 mg ugljikovodika potrebna su 3...4 mg kisika. Visoka potrošnja kisika za razgradnju mineralnih ulja uz istodobno ometanje otapanja kisika iz zraka smanjuje količinu otopljenog kisika u vodi. Mineralna su ulja otrovna za žive organizme u vodi već kad je koncentracija manja od 1 mg/L. Male koncentracije mineralnih ulja čine ribu i školjke neprikladnima za jelo zbog neugodna mirisa.

Pesticidi i druga zaštitna sredstva koja se upotrebljavaju u poljoprivredi nalaze se najviše u poljoprivrednim, ali ih ima i u industrijskim otpadnim vodama. Među najopasnije pesticide s obzirom na onečišćenje voda ubrajaju se klorirani ugljikovodici: DDT, lindan, dieldrin, endrin. Klorirani ugljikovodici gomilaju se u masnim tkivima (tabl. 3). DDT ometa fotosintezu jednostaničnih algi. Količina od 10 µg/L smanjuje fotosintezu za 40% u 24 sata.

Tablica 3
GOMILANJE KLORIRANIH UGLJKOVODIKA U BIOLOŠKOM LANCU

Uzorak	DDT	Dieldrin
Otpadna voda	36...130 ng/L	100...300 ng/L
Mulj otpadne vode	10...500 ng/kg	1...2500 ng/kg
Plankton	0,2...100 µg/kg	1...23 µg/kg
Mekušci	0,008...0,1 mg/kg	0,001...0,02 mg/kg
Ribe	0,003...0,05 mg/kg	0,001...0,02 mg/kg
Tuljani	0,01...20 mg/kg	0,06...2,8 mg/kg
Morske ptice	0,6...3,1 mg/kg	—

Od halogenih derivata ugljikovodika najopasniji su poliklorirani bifenili (PCB). Uz koncentraciju od 1 µg/L smanjuje se rast oštige za 20%. Otrovno djelovanje polikloriranih bifenila na organizme u vodi opaženo je kod koncentracije od 1...10 mg/L.

Detergenti se nalaze u kućanskim i industrijskim otpadnim vodama. Postojanost detergenata ovisi o njihovoj molekularnoj strukturi. Alkilbenzensulfonati (ABS) tetramernog tipa ili tvrdi detergenti nisu razgradljivi, odnosno njihova je razgradnja vrlo

spora. U mnogim zemljama zabranjena je proizvodnja onih detergenata kojima je biološka razgradnja manja od 80%. Linearni alkilsulfonati (LAS), koji se nazivaju mekim detergentima, lakše se razgrađuju, ali su dva do četiri puta otrovniji od tvrdih (ABS) detergenata. Općenito se smatra da je koncentracija veća od 0,2 mg/L linearnih alkilsulfonata u vodi opasna za životne zajednice. Biološki nerazgradljivi detergenti stvaraju pjenu na površini vode te smanjuju proces otapanja kisika iz atmosfere. Detergentima se nadalje unoše u prirodne vode veće količine fosfata, što može ubrzati eutrofizaciju vodnog sustava. Već koncentracija detergenata od 1 mg/L ometa razvoj jednostaničnih algi. Smetnje su više izražene pri upotrebi kationskih, a manje kad se upotrebljavaju anionski i neionski detergenti. Površinski aktívne tvari koje se upotrebljavaju za uklanjanje mineralnih ulja, a sadrže aromatske ugljikovodike, vrlo su otrovne za biljke i životinje.

Plastičnih tvari u obliku konca, mrežica i vrećica nalazi se u kućanskim i industrijskim otpadnim vodama. Ekološko značenje takvih postojanih tvari nije još potpuno rastumačeno.

Otrovni onečišćivač svaka je tvar koja prema svojim svojstvima ili količini uzrokuje bolest živog organizma, nenormalno ponašanje, kancerogene i genetičke promjene, fiziološke smetnje, fizičke deformacije i smrt.

Teški metali, kao nikal, mangan, olov, krom, kadmij, cink, bakar, željezo i živa tipični su sastojci industrijskih otpadnih voda, ali ih u manjim količinama ima u svim otpadnim vodama. Neki od tih metala u malim količinama potrebni su za razvoj organizama. Međutim, u većim količinama postaju otrovne tvari s vrlo nepovoljnim posljedicama.

Metali u čistom obliku manje su opasni od topljivih metalnih spojeva. Neki su organometalni spojevi kao metilživa i tetraetiloživo najotrovnije tvari.

Kad se uzme u obzir negativni utjecaj metala (otrov za ribe, gomilanje u biološkom lancu, opasnost od upotrebe proizvoda za jelo iz vode, sinergijski učinak) utvrđen je redoslijed metala u vodi prema opasnosti:



Drugu grupu otrovnih onečišćivača čine cijanidi, kromati i fluoridi. Pojavljuju se u industrijskim otpadnim vodama.

Utjecaj otrovnih tvari utvrđuje se testovima toksičnosti, a na temelju tih testova određuju se *sigurnosne koncentracije*. Sigurnosne koncentracije nisu u svim zemljama jednake, pa tako granične, bezopasne koncentracije žive u morskim organizmima iznose:

Švedska	0,2 mg/kg	Italija, Grčka	0,7 mg/kg
SAD, Kanada	0,5 mg/kg	Japan	1,0 mg/kg

Mikroorganizmi se nalaze u svim otpadnim vodama. *Saprofagi* mikroorganizmi (reducenti — razlagачi) biološki razgrađuju organsku tvar, troše otopljeni kisik, pa se može pojavititi neželjeni manjak kisika, odnosno anaerobno stanje. Razlagачi razgrađuju organsku tvar do anorganske te tako obavljaju dio temeljnog postupka u kruženju tvari u biosferi (sl. 3).

Mikroorganizmi iz probavnog trakta ljudi i životinja (*fecalni*) temeljni su pokazatelj kućanskih otpadnih voda, ali ih ima u industrijskim i poljoprivrednim otpadnim vodama, pogotovo kad se u poljoprivredi upotrebljava stajski gnoj ili mulj iz otpadnih voda. Među mikroorganizmima fekalnog porijekla ima i patogenih koji mogu biti uzročnici tifusa, paratifusa, dizenterije, kolere, tuberkuloze, poliomijelitisa i hepatitisa. Bolesti se mogu prenijeti kupanjem u nečistoj vodi zbog dodira s kožom ili gutanja vode i konzumiranjem proizvoda iz vode, a posebno školjki koje se jedu sirove. Mogućnost zaraze kupanjem u nečistoj vodi mnogostruko je manja nego konzumiranjem proizvoda iz nečistih voda. Zbog teškoća u određivanju patogenih mikroorganizama, kao *organizam indikator* služe bakterije normalne crijevne flore ljudi i životinja. Najčešće se kao indikator uzimaju ukupni koliformni organizmi, a zatim *Escherichia coli* (E. coli) i *Streptococcus faecalis* (S. faecalis). Uobičajeno je da se ukupni koliformni organizmi izražavaju kao najvjerojatniji broj u jedinicama obujma.

Kad mikroorganizmi fekalnog porijekla (u koje su uračunati i patogeni) dospiju u okoliš s drugaćnjim uvjetima za razmnožavanje (temperatura, koncentracija vodikovih iona, osmotski tlak, ultravioletno zračenje), postepeno iščezavaju. Vrijeme iščezavanja nije jednako za sve mikroorganizme, a ovisi o sadržaju otopljenih soli u vodi.

Radioaktivne tvari u vodi mogu biti prirodnog ili umjetnog porijekla. Živi organizmi, u normalnim uvjetima, prilagođeni su zračenjima prirodnih izvora (radioaktivni elementi Zemljine kore i kozmička zračenja).

Radionuklidi se mogu nalaziti u industrijskim otpadnim vodama, odnosno vodama nuklearnih elektrana i industrijskih pogona u kojima se upotrebljavaju radioaktivne tvari. Radioaktivni otpaci koji u ekološki sustav dolaze zbog čovjekove djelatnosti mogu znatno povećati doze zračenja te utjecati na promjene u sustavu. Povećano zračenje može uzrokovati genetičke promjene, sterilnost, kancerogene bolesti i smrt. Radionuklidi ulaze u biokemijske procese, koncentrirajući se od njih prema višim organizmima prehrambenog lanca, te mogu biti vrlo opasni za čovjeka.

ODVOĐENJE OTPADNIH VODA

Otpadne vode odvode se od mjesta nastanka do prijamnika uz prethodno čišćenje kanalizacijom koju čine skup cijevi, kanala i građevina.

Kanalizacijom se odvode kućanske (sanitarne) i industrijske otpadne vode. Kad se kućanske i industrijske otpadne vode odvode zajedničkim kanalima nazivaju se komunalnim ili gradskim otpadnim vodama. Sa svih većih površina gdje su čovjekovom djelatnošću promijenjeni uvjeti prirodnog procjedivanja i tečenja oborinskih voda (stambena i turistička naselja, sportske, kulturne, trgovачke i industrijske zone) moraju se odvoditi i oborinske vode.

Odvođenje otpadnih voda kanalizacionim podsustavom funkcionalno je vezano s vodoopskrbom, odnosno vodovodnim podsustavom. Na svim onim područjima gdje čovjek stanuje, radi i odmara se upotrebljava se voda, pa se mijenja kvaliteta vode tako da postaje neupotrebljiva, pa i opasna za zdravlje. Zbog toga ju je potrebno prikupiti, odvesti i kontrolirano ispuštati u prirodne ili umjetne prijamnike.

U dalekoj prošlosti odvodene su otpadne vode jednostavnim otvorenim kanalima. Postoje dokazi o gradnji kanalizacije u Indiji oko -4000. god., a u Egiptu su građeni kanali oko -2500. god. U Rimu je *cloaca maxima* izgrađena -600. god. Ostaci rimske kanalizacije nadjeni su na mnogim arheološkim lokacijama u našoj zemlji, a vjerojatno je najbolje sačuvana kanalizacijska mreža Dioklecijanove palače u Splitu. U srednjem vijeku zaostaje razvoj kanalizacionih mreža. Međutim, u Dubrovniku u XIII ili XIV stoljeću izgrađena je kanalizaciona mreža, te se njen veći dio još i danas upotrebljava za odvodnju stare gradske jezgre. Mnogi veliki evropski gradovi započeli su gradnju kanalizacionih mreža u XVIII i XIX stoljeću.

Sustavi odvodnje. Otpadne i oborinske vode odvode se razdjelnim, mješovitim i polurazdjelnim sustavima. Kad se *razdjeljni* (odvojeno) odvode vode, grade se dvije odvojene kanalizacione mreže, od kojih jedna odvodi otpadnu, a druga oborinsku vodu. Za *mješoviti sustav* odvođenja vode gradi se zajednički kanal za odvodnju otpadne i oborinske vode. *Polurazdjelni* sustav odvodnje ima dvije odvojene mreže kanala, a glavni se sakupljači spajaju posebnim preljevnim građevinama. Kanalima otpadne vode odvode se uz otpadne vode i prve oborinske vode koje se iz kanala oborinskih voda preljevaju. Kanalima oborinske vode odvode se oborine veće intenzivnosti. Izbor sustava odvodnje ovisi o mnogo činilaca kao što su količina otpadnih i oborinskih voda, topografski oblik, klimatske prilike, gustoća stambene gradnje, položaj prijamnika prema slivnom području, svojstva prijamnika (hidrološka, ekološka) i gospodarski činioци koji ubuhvaćaju troškove gradnje i održavanja kanalizacionog sustava.

Higijenski je najpovoljniji polurazdjelni sustav. Tada se sve otpadne vode i prve oborinske vode koje ispiru površinu odvodnje odvode do uređaja za pročišćivanje. Relativno čista oborinska voda s ispranih površina odvodnje ispušta se neposredno u prijamnike. Razdjelni i mješoviti sustavi smatraju se higijenski podjednakima. U razdjelni sustav ispuštaju se u

prijamnike i prve oborinske vode, ali i one od pranja ulica, koje su vrlo nečiste i koje su prema koncentraciji i sastavu otpadnih tvari približno jednakom komunalnim otpadnim vodama. U mješovitom sustavu preljevne su vode (koje se ispuštaju da se postigne optimalno iskoristjenje uređaja za čišćenje vode) izmiješane i onečišćene otpadnim vodama, pa se u prijamnike ispušta i dio otpadnih tvari koje mogu utjecati na iskoristavanje voda iz prijamnika.

Gospodarski i tehnički je najpovoljniji polurazdjelni sustav zbog gradnje i održavanja dvostrukе mreže te posebnih preljevnih građevina. Prednost je razdjelnog sustava s obzirom na gospodarstvo mogućnost etapne gradnje, mogućnost izvedbe manjih kanalizacionih mreža za oborinsku vodu s više ispusta. Nepovoljni su veći investicijski i pogonski troškovi. Mješoviti je sustav povoljan, jer je potrebna gradnja samo jedne kanalizacione mreže, ali je nepovoljan s obzirom na etapnu gradnju, pogon crpnih stanica i uređaja, male brzine i taloženje iz otpadnih voda u suhom razdoblju. Taj je sustav nepovoljan i zbog povećanih protoka na početku oborina i zbog povremenog plavljenja ulica i podruma zgrada mješavinom otpadne i oborinske vode.

Količina otpadnih voda bitan je podatak za dimenzioniranje svih dijelova kanalizacionog podsustava (mreže, uređaji, ispušti). Mjerodavna količina upotrijebljenih voda ovisi o količini vode iz komunalnog vodovodnog podsustava i iz drugih izvorišta, kao što su zdenci za individualnu opskrbu stanovnika ili industrije, te iz industrijskih vodovoda. Kanalizacija se gradi za vijek trajanja od 50 i više godina. Zbog toga nije ni moguće izmjeriti dotok otpadnih voda, već je potrebno te količine procijeniti na temelju prostornih i gospodarskih razvojnih planova.

Kućanske otpadne vode. Ukupna količina vode koja se dovodi u stambeno naselje ne dospijeva u kanalizacionu mrežu. Dio vode ishlapi ili se procijedi pri pranju ulica i zalijevanju zelenila, a dio se ispari tijekom kuhanja i pripreme tople vode. Računa se da od ukupne vodoopskrbne količine vode za potrebe naselja u kanalizacionu mrežu dospijeva 70...80%. Za pojedine stambene zgrade otpadne vode mogu se procijeniti na temelju srednje količine otpadne vode prema izljevnim mjestima (tabl. 4). Srednja dnevna količina otpadnih voda za stambena naselja može se izračunati na temelju analize svih potrošača (tabl. 5).

Kućanske otpadne vode ne troši se jednoliko u toku dana, tjedna i godine. Veće razlike izražene su u manjim naseljima,

Tablica 4
SREDNJA DNEVNA KOLIČINA OTPADNE VODE PO STANOVNIKU

Izljevno mjesto	Količina otpadne vode L
Kada	30..75
Tuš	25..45
Zahod	40..90
Umivovalnik	10..15
Sudoper	20..30
Stroj za pranje rublja	15..35

Tablica 5
SREDNJA DNEVNA KOLIČINA OTPADNE VODE PO POTROŠAČU I PREMA MJESTU POTROŠNJE

Mjesto potrošnje	Potrošač	Količina otpadne vode L
Stambena zgrada	stanar	140..290
Škola	učenik	20..65
Trgovina	radnik	30..50
Kavana, bar	gost	5..30
Restauracija	obrok	8..15
Hotel	gost	210..350
Motel	gost	150..240
Kamp	gost	80..150
Kino, kazalište	posjetilac	10..15
Bolnica	bolesnik	500..950
Ured	radnik	30..65

osobito u turističkim područjima ili naseljima s izraženim sezonskim djelatnostima. Godišnje i dnevne oscilacije potrošnje vode mogu se procijeniti na temelju analize potrošnje vode u vodovodnim sustavima.

Kad nisu poznate oscilacije dobave u vodoopskrbnom sustavu, može se maksimalni dotok otpadne vode izračunati iz izraza

$$q_{\max} = K q, \quad (1)$$

gdje je K koeficijent maksimalnog satnog dotoka (omjer između maksimalne i srednje satne potrošnje vode u toku dana), a q srednji dotok otpadne vode u litrama na sekundu. Koeficijent maksimalnog satnog dotoka računa se iz izraza (H. M. Gift):

$$K = 5,0 P^{-\frac{1}{6}}, \quad (2)$$

gdje je P broj stanovnika slivnog područja u tisućama, ili iz izraza (N. F. Fedorov):

$$K = 2,69 q^{-0,121}, \quad (3)$$

gdje je q srednji dotok otpadne vode u litrama na sekundu.

Koeficijent maksimalnog satnog dotoka prema veličini naselja iznosi $1,33 \dots 3,0$ (tabl. 6).

Tablica 6
KOEFICIJENTI MAKSIMALNOG SATNOG DOTOKA

Broj stanovnika u naselju	Koeficijent maksimalnog dotoka
do 5 000	3,0
20 000 ... 50 000	2,0
100 000 ... 200 000	1,5
više od 200 000	1,33

Industrijske otpadne vode. Količina industrijskih otpadnih voda ovisi o tehnološkom postupku. Za postojeće industrije količina otpadne vode može se procijeniti na temelju mjerjenja, uzimajući u obzir čitav proizvodni ciklus.

Za nove industrije otpadna voda mora se procijeniti prema planiranom tehnološkom postupku, opseg godišnje proizvodnje i predviđenoj potrošnji vode po jedinici proizvodnje. Kad se procjenjuje količina otpadnih voda, potrebno je utvrditi da li je za tehnološku rasključnu vodu predviđen zatvoreni ciklus, dakle s ponovnim iskoriščavanjem vode, ili otvoreni ciklus, bez ponovnog iskoriščavanja. Kad nije predviđena ponovna upotreba vode, $85 \dots 95\%$ upotrijebljene vode ispušta se kao otpadna voda. Kad se ne raspolaze s podacima za pojedine industrijske zone, može se procijeniti da dotjecanje otpadne vode iznosi $0,5 \dots 1,5 \text{ L/s}$ po hektaru za industriju koja ne upotrebljava vodu u tehnološkim postupcima. Srednja dnevna potrošnja sanitarnih voda po zaposlenom radniku u industriji iznosi $30 \dots 95 \text{ L}$.

Oscilacije dotoka industrijske otpadne vode ovise o proizvodnom programu i o broju radnih sati na dan. Ne postoji opća zakonitost oscilacija dotoka industrijske otpadne vode. Moguće je utvrditi omjer između maksimalnog i srednjeg dotoka na temelju analize sličnih pogona.

Procjedne vode jesu podzemne vode koje prodiru u kanalizacijske cijevi kroz slabe spojeve, kućne priključke i priključke cijevi na ulazna okna. Nadalje, u taj se tip voda, koje se mogu nazvati i *tuđim vodama*, ubrajaju i neposredni dotoci oborinske vode koja prolazi kroz poklopce ulaznih okana kanalizacijske mreže, zatim drenažne vode uz temelje građevina, pogrešni priključci krovova i dvorišta zgrada.

Procjedne vode nisu prema svojim svojstvima i sastavu otpadne vode, ali se moraju uzeti u obzir kad se dimenzioniraju kanalizacijske mreže radi kontrole propusne moći kanala, pogotovo za razdjelnju kanalizaciju, te za proračun pogonskih troškova crpnih stanica i uređaja za čišćenje otpadne vode.

Količina procjednih voda ovisi o hidrogeološkim i hidrološkim prilikama, površini slivnog područja, načinu gradnje i o održavanju kanalizacijske mreže. Postoji mnogo istaknutih podataka, odnosno preporuka za proračun dotoka procjednih

voda. Kao gornja granična vrijednost može se računati da je dotok procjedne vode jednak protoku otpadne vode promatranog kanala. Procjenjuje se da dnevna količina procjedne vode po hektaru površine slivnog područja iznosi $0,2 \dots 30 \text{ m}^3$.

Maksimalni dnevni dotok procjedne vode najčešće se određuje pomoću koeficijenta oscilacije koji iznosi $1,5 \dots 2,0$.

Oborinske vode mogu se samo uvjetno nazvati otpadnim vodama. Naime, ispiranjem stambenih, prometnih i industrijskih površina s prvim oborinama nakon sušnog razdoblja odvode se i otpadne tvari s površine, pa su prve oborinske vode prema sastavu i koncentraciji otpadne tvari slične komunalnim otpadnim vodama.

Proračun količine oborinske vode koja dotječe do kanalizacijske mreže hidrološki je problem (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 396). Na temelju statističke obradbe izmjerenih podataka potrebno je utvrditi ovisnost intenzivnosti oborina o trajanju oborine i o povratnom razdoblju intenzivnih oborina.

Zbog ekonomskih razloga kanalizacijske se mreže ne grade za potpuno sigurnu odvodnju slivnog područja, već se unaprijed računa s plavljenjem zbog nedovoljne propusne moći oborinske kanalizacije. Izbor učestalosti plavljenja, odnosno povratnog razdoblja računske ili mjerodavne oborine trebalo bi izvršiti usporednom štetom koja nastaju od plavljenja i koristi zbog smanjenja ukupnih troškova kanalizacijskog podsustava. U praksi se proračun troškova i dobrobiti ne provodi, pogotovo što bi uz pojavu štete trebalo dodati i mogućnost pojave zaraznih bolesti kao posljedice plavljenja, osobito kad se promatra mješoviti sustav odvodnje.

Povratno razdoblje računske kiše procjenjuje se prema specifičnim prilikama, pri čemu je posebno važna namjena površine za odvodnju i oblik zemljišta, odnosno mogućnost otjecanja po površini, bez opasnosti od gomilanja vode u terenskim uvalama.

Povratna su razdoblja s kojima se računa:

a) oborinska kanalizacija stambenih naselja i industrijskih područja kad plavljenje ne uzrokuje veće štete

$P = 0,5 \dots 1 \text{ god.}$

b) oborinska kanalizacija gradova i naselja u nepovoljnijim uvjetima

$P = 1 \dots 3 \text{ god.}$

c) mješoviti sustav odvodnje naselja i industrije te oborinska kanalizacija u nepovoljnijim uvjetima i kad plavljenje uzrokuje velike štete

$P = 3 \dots 5 \text{ god.}$

d) posebno nepovoljni uvjeti za odvodnju industrijskih područja kad se traži visok stupanj sigurnosti

$P = 10 \dots 50 \text{ god.}$

Dotjecanje oborinske vode može se odrediti prema empirijskim jednadžbama ili racionalnom metodom, te posebnim studijama koje uzimaju u obzir korelacije odnose između oborina i otjecanja.

Empirijska jednadžba za dotok oborinske vode u jedinici vremena ima oblik

$$Q = i A C \varphi \psi, \quad (4)$$

gdje je i intenzivnost računske oborine (L/s po hektaru), A površina slivnog područja (ha), C koeficijent otjecanja, φ koeficijent zakašnjenja dotoka, a ψ koeficijent nejednolike

Tablica 7
KOEFICIJENTI OTJECANJA ZA RAZLIČITE POVRŠINE

Površina	Koeficijent otjecanja
Prometnica (asfalt i beton)	0,70 ... 0,95
Krovovi	0,75 ... 0,95
Tratine, livade	
— propusno zemljište:	
ravno (nagib do 2%)	0,05 ... 0,10
srednje nagnuto (2 ... 7%)	0,10 ... 0,15
strmo (više od 7%)	0,15 ... 0,20
— nepropusno zemljište:	
ravno (nagib do 2%)	0,13 ... 0,17
srednje nagnuto (2 ... 7%)	0,18 ... 0,22
strmo (više od 7%)	0,25 ... 0,35
Šuma	0,01 ... 0,02

intenzivnosti oborine. Intenzivnost oborina odabire se kao nepromjenljiva veličina za cijelo slivno područje. *Koeficijent otjecanja* omjer je oborina koje otječu po površini i ukupne oborinske vode. Taj koeficijent ovisi o vrsti zemljišta ili površine koju ispira, nagibu zemljišta, klimatskim, vegetacijskim, hidrogeološkim i drugim prilikama (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 396). Postoji više empirijskih jednadžbi za proračun koeficijenta otjecanja, a najčešće se upotrebljavaju srednje vrijednosti koje ovise o vrsti površina (tabl. 7).

Koeficijent zakašnjenja dotjecanja oborina računa se prema jednom od slijedećih izraza:

$$a) \quad \varphi = \frac{1}{\pi \sqrt{A}}, \quad (5)$$

gdje je A površina slivnog područja (ha), a n koeficijent koji ovisi o nagibu tla i obliku slivnog područja ($n = 4$ za mali nagib i izdužen sлив, a $n = 8$ za strmi teren i lepezasti sлив);

$$b) \quad \varphi = \frac{1}{\pi \sqrt{L}}, \quad (6)$$

gdje je L duljina kanala u stotinama metara, a n koeficijent koji ovisi o padu kanala ($n = 2,5$ za mali nagib, a $n = 3,5$ za veliki nagib kanala);

$$c) \quad \varphi = \frac{2600}{1700 + \sum t}, \text{ za } t = 0 \dots 53 \text{ min} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{3560}{3500 + \sum t}, \text{ za } t = 53 \dots 150 \text{ min}, \quad (8)$$

gdje je t vrijeme tečenja po površini ili u kanalima. Koeficijent zakašnjenja iznosi od $0,3 \dots 1,0$.

Koeficijent nejednolikosti intenzivnosti oborine računa se obično prema izrazima:

$$\psi = 1 - 0,006\sqrt{l}, \quad (9)$$

$$\psi = 1 - 0,005\sqrt{2l}, \quad (10)$$

gdje je l polovica duljine slica (m). Izraz (9) vrijedi za slike za koje je omjer srednje širine i duljine slica $\leq 0,5$, a izraz (10) kad je taj omjer $> 0,5$.

Prema racionalnoj metodi dotjecanje oborinske vode u jedinici vremena računa se iz izraza

$$Q = i A c, \quad (11)$$

gdje je i intenzivnost oborine prema trajanju kiše (L/s po hektaru), A površina slica (ha), a c koeficijent otjecanja. Racionalna metoda temelji se na postavci da je maksimalno dotjecanje oborine do promatranoj presjeku kanalizacijske mreže funkcija trajanja kiše, odnosno da je trajanje mjerodavne oborine jednako vremenu dotjecanja do promatranoj presjeku. Vrijeme dotjecanja oborinske vode do promatranoj presjeku, koje se još naziva vremenom koncentracije, jednako je zbroju vremena dotjecanja oborine do prvog slivnika (t_s) i vremenu protjecanja kroz kanalizacijsku mrežu (t_1), pa je vrijeme koncentracije

$$t = t_s + t_1. \quad (12)$$

Vrijeme dotjecanja do prvog slivnika iznosi $5 \dots 10$ min na gusto izgrađenim površinama, a $20 \dots 30$ min za rijetko izgrađene površine na kojima su slivnici s velikim razmakom.

Budući da se pretpostavlja jednolika intenzivnost oborine po cijelom području, što ne odgovara stvarnim prilikama (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 396), primjena te metode ograničena je na slivna područja površine do 15 km^2 .

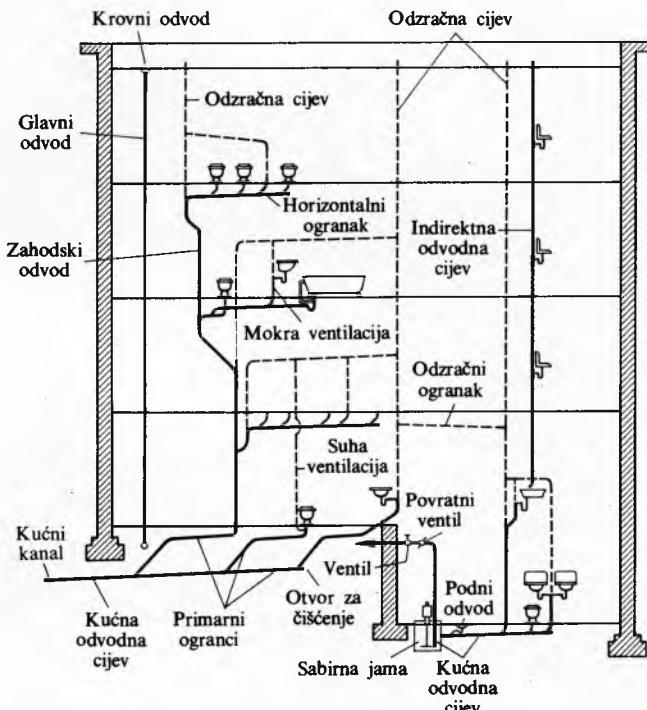
Kućna kanalizacija

Kućna kanalizacija dio je kanalizacijskog podsustava od izljevnih mjestih otpadne vode do priključka na komunalnu (uličnu, javnu) kanalizacijsku mrežu. Otpadna voda prikuplja se na izljevnim mjestima pomoću sanitarnih i drugih izljeva kao što su umivaonici, zahodske školjke, kade za kupanje i

sudoperi, priključci za strojeve za pranje rublja i posuđa, podne rešetke, priključci spremnika i strojeva.

Kućna kanalizacija treba zadovoljiti sljedeće zahtjeve: a) otpadne vode od izljevnog mesta do ulične kanalizacije moraju se odvesti na najbrži mogući način bez zaustavljanja otpadne tvari; b) ne smije se dopustiti da plinovi i mikroorganizmi iz kanalizacijske mreže dospiju u radne i stambene prostorije; c) kućna kanalizacija mora biti dovoljno čvrsta i elastična tako da ostane vodonepropusna i kad se sliježu i pomiču građevine ili njezini dijelovi.

Kućna se kanalizacija (sl. 4) sastoji od priključnih cijevi (ogranaka), vertikalnih cijevi i horizontalne cijevi (temeljna kanalizacija).



Sl. 4. Shema kućne kanalizacije

Na priključku svih izljeva postavlja se na ogranke vodenim zatvaračima (sifon). Kad se na ogranku priključuju otpadne vode koje sadrže znatne količine masti ili mineralnih ulja, mора se postaviti mastolov prije priključka na ogranku. Radi sprečavanja isisavanja vode, vodenim zatvaračima priključuju se na ventilacijske cijevi koje se spajaju na vertikalne cijevi. Ogranci su od olova, lijevanog željeza ili plastičnih materijala.

Vertikalne cijevi prikupljaju vodu iz ogranaka i odvode je do podruma, odnosno horizontalnih kanala. Kako bi se omogućila ventilacija kućne kanalizacije, vertikalne cijevi sežu iznad krova $1 \dots 1,5$ m. Vertikalni su kanali cijevi od lijevanog željeza, keramike, azbestnog cementa ili plastičnih masa (najčešće od polivinilklorida). Minimalni promjer vertikalnih cijevi za priključak otpadnih voda bez krute tvari iznosi 50 mm, a 100 mm za priključak zahodske školjke.

Horizontalna ili temeljna kanalizacija prikuplja otpadnu vodu iz svih vertikalnih cijevi. Kad je predviđena mješovita odvodnja, mogu se na temeljnu kanalizaciju priključiti i kišne vertikalne cijevi, odnosno cijevi kojima se odvodi oborinska voda s krovova. Kad se izvodi razdjelna odvodnja, kišne vertikalne cijevi priklučuju se na posebnu mrežu horizontalne oborinske kanalizacije. Horizontalna kanalizacija dimenzionira se i konstruiira prema istim principima kao i ulična kanalizacija. Temeljna kanalizacija gradi se cijevima od lijevanog željeza, keramike, azbestnog betona, betona, plastičnih masa. Najmanji promjer horizontalnih kanala iznosi 100 mm kad su vertikalne cijevi promjera 50 mm, a 150 mm kad priključne vertikalne cijevi imaju promjer od 100 mm.

Oblikovanje kanalizacijske mreže

Oblikovanjem kanalizacijske mreže određuje se položaj kanala prema prometnicama i zgradama, oblik i dimenzije poprečnog presjeka kanala, udaljenost ulaznih okana i položaj drugih građevina u mreži. Pogonske prilike u kanalizacijskoj mreži bitno utječu na izbor pojedinih elemenata.

Otpadne vode u kanalizaciji otječu djelovanjem gravitacijskih sila i razlike tlakova. Tlakovi mogu biti veći (pretlak) i manji (podtlak, vakuum) od atmosferskoga. Oborinske vode najčešće se odvode samo gravitacijski, a iznimno tlačnim pogonom (tlak veći od atmosferskoga).

Kanalizacijske mreže s gravitacijskim pogonom

Dimenzioniranje kanala. Za proračun gubitka visine ili otpora izravnog u metrima stupca vode (h_f) na dionicu kanala najčešće se upotrebljava Darcy-Weisbachova jednadžba

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (13)$$

gdje je λ koeficijent otpora trenja prema Moodyjevu dijagramu (v. *Mehanika fluida*, TE 8, str. 170), L duljina dionice kanala (m), D unutrašnji promjer kanala (m), v brzina protjecanja vode u kanalu (m/s), a g ubrzanje Zemljine teže (m/s²). Koeficijent trenja za područje od hidraulički glatkih do potpuno hrapavih cijevi određuje se prema Colebrookovoj jednadžbi

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{K}{3,71 D} \right), \quad (14)$$

gdje je Re Reynoldsova značajka, D unutrašnji promjer kanala (m), a K pogonska hrapavost kanala (m). Za kanale koji nemaju kružni oblik (jajoliki, kapasti i dr.) umjesto promjera može se uvrstiti četverostruki hidraulički polumjer

$$D = 4R. \quad (15)$$

Koeficijent kinematičke viskoznosti (za proračun Reynoldsove značajke) ovisi o temperaturi, odnosno gustoći vode. Za kućanske otpadne vode može se računati s vrijednošću $v = 1,31 \cdot 10^{-6}$ m²/s, dok je za industrijske otpadne vode potrebno odrediti koeficijent kinematičke viskoznosti prema stvarnim prilikama.

Pogonska hrapavost obuhvaća hrapavost stijenki i spojeva, utjecaj kućnih priključaka i odstupanja od idealnog oblika poprečnog presjeka. Za proračun kanalizacijskih mreža upotrebljavaju se vrijednosti pogonske hrapavosti $K = 0,4 \dots 1,5$ mm za normalne kanale s kućnim priključcima, već prema izvedbi kanala. Za kanalizacijsku mrežu od glatkih cijevi pogonska je hrapavost $K = 0,4$ mm, za mrežu od običnih cijevi $K = 1,5$ mm, a za tlačne vodove i prigušne kanale je $K = 0,25 \dots 1,0$ mm, već prema izvedbi vodova i kanala.

Oblik poprečnog presjeka kanala ovisi o proračunskom protoku i o materijalu od kojeg je izgrađen. U posljednje vrijeme sve se više upotrebljavaju industrijski izrađene cijevi okruglog presjeka. U našoj zemlji primjenjuje se polumontazna gradnja cijevi od armiranog betona s unutrašnjom oblogom od azbestnog betona kružnog presjeka do promjera od 3,0 m. Osim okruglih presjeka, za srednje protoke upotrebljava se jajoliki presjek, a za veće protoke kapasti, potkovičasti i drugi presjeci sastavljeni od dijelova kruga ili elipse (sl. 5).

Minimalan presjek kanala imaju kanali na početnom dijelu kanalizacijske mreže. S otpadnim vodama dospijevaju u kanalizaciju krupne otpadne tvari, pa je potrebno predvidjeti takve dimenzije kanala koji se neće začepiti. Presjek uličnog kanala mora biti jednak ili veći od presjeka priključnog kanala kućne kanalizacije, odnosno skupnog priključka grupe građevina. Minimalan promjer kanala otpadne vode okruglog presjeka za razdjelnu odvodnju iznosi 0,20 m, a za mješovitu, odnosno za oborinsku kanalizaciju 0,30 m.

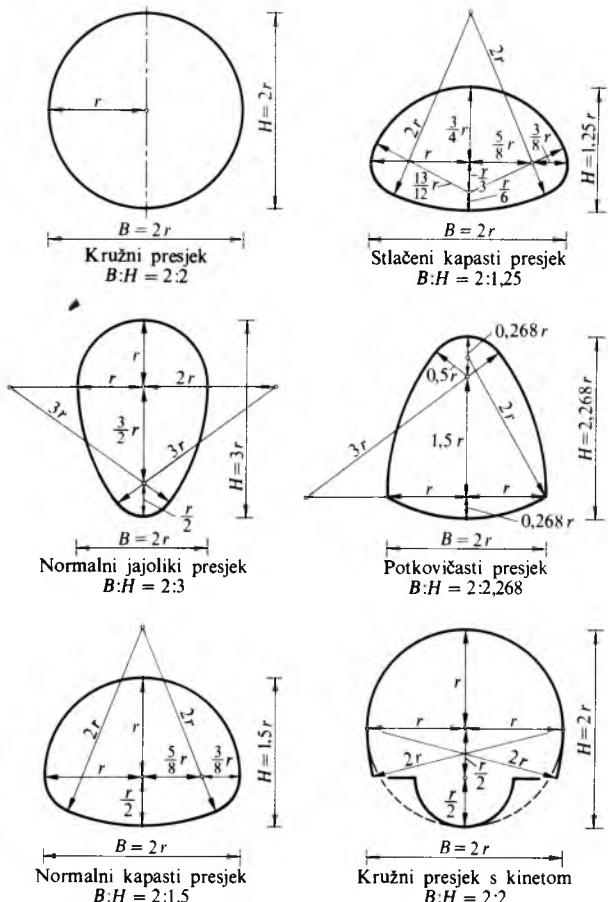
Najmanja brzina vode u kanalu uvjetovana je održavanjem krutina u suspendiranom stanju, odnosno samočišćenjem kanala. Minimalna brzina ovisi o specifičnoj težini i promjeru čestica

suspendirane tvari, te o koeficijentu trenja. Da bi se spriječilo taloženje u kanalima otpadne vode, minimalna brzina treba da iznosi 0,6 m/s kad je kanal potpuno ispunjen ili kad je razina vode do polovice visine kanala. Snijženjem visine punjenja smanjuje se brzina protjecanja. Brzina od 0,3 m/s donja je granica uz koju se još ne talože organske tvari, dok taloženje mineralnih tvari (pijeska) počinje kad je brzina manja od 0,75 m/s. Zbog toga se za oborinsku kanalizaciju preporučuje da brzina ne bude manja od 0,9 m/s, da bi se spriječilo taloženje pijeska i šljunka. Najmanji pad kanala uvjetovan je brzinom samočišćenja i izračunava se kao funkcija minimalne brzine, prema izrazu (13).

Najveća brzina vode u kanalu ograničena je sastavom otpadne vode i materijalom od kojeg je izgrađen kanal. Otpadne vode koje sadrže mineralne čestice u većim koncentracijama, kao npr. oborinske vode, mogu pri većim brzinama nanjeti štete u kanalima habanjem stijenki i slabljenjem spojeva. U kanalima otpadne vode najveća je dopuštena brzina 2,5 … 3,0 m/s kad se primjenjuje uobičajena izvedba kanala. U kanalima oborinske vode, odnosno u mješovitoj kanalizaciji, gdje se najveće brzine rijetko pojavljuju i kratko traju, može se računati s većim dopuštenim brzinama, već prema materijalu i izvedbi kanala. Za kanale uobičajene izvedbe preporučuje se najveća brzina 4,0 … 5,0 m/s, a za posebne izvedbe kanala (npr. čelične cijevi) najveća brzina smije iznositi do 8,0 m/s. Maksimalan pad kanala ovisi o izboru najveće dopuštene brzine vode u kanalu, prema izrazu (13).

Stupanj punjenja kanala omjer je visine vode u kanalu uz računski protok i ukupne visine kanala. Za kanale otpadne vode (razdjelna odvodnja) preporučuje se djelomično punjenje kanala kako bi se poboljšalo provjetravanje kanalizacijske mreže i osigurao prostor za nepredviđeni dotok tuđih voda. Za kanale promjera do 0,3 m preporučuje se stupanj punjenja 0,6, a za promjere veće od 0,9 m stupanj punjenja iznosi 0,8.

Proračunski protok oborinske vode traje kratko. U sušnom razdoblju kanali su oborinske vode prazni, a u kanalima

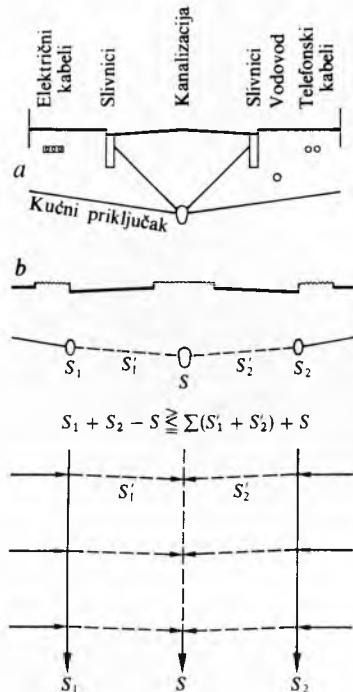


Sl. 5. Oblici poprečnog presjeka kanalizacijskih cijevi

mješovite kanalizacije protječe samo otpadna voda, pa je visina punjenja vrlo malena. Zbog toga se kanali oborinske vode i kanali mješovite kanalizacije smiju puniti do tjemena kanala (stupanj punjenja 1,0).

Pri proračunu protjecanja djelomično napunjene kanala treba uzeti u obzir i utjecaj trenja zraka u gornjem dijelu kanala, pa se dobiva da propusnost djelomično ispunjenog kanala nije nikada veća od potpuno ispunjenoga.

Položaj kanala u poprečnom presjeku prometnice treba uskladiti s ostalim instalacijama koje se tamo smještaju (vodovod, toplovod, plinovod, električni i telefonski kabeli), ali i s javnim zelenilom, stupovima javne rasvjete i temeljima drugih građevina. Kad su prometnice široke do 30,0 m, kanalizacijske cijevi (razdjelne ili mješovite odvodnje) najčešće se postavljaju sredinom prometnice. Kad su prometnice šire, treba razmotriti mogućnost gradnje kanala s obje strane ulice, a kad su potrebni vrlo veliki presjeci kanala, postoji mogućnost gradnje paralelnih sabirnih kanala (sl. 6). Položaj i broj kanala u poprečnom presjeku prometnice treba odrediti na temelju usporedbe troškova gradnje priključnih i paralelnih kanala.



Sl. 6. Smještaj kanala ispod prometnica. a) ulica manje širine, b) ulica veće širine; S glavni sakupljač, S_1 i S_2 bočni sakupljači, S'_1 i S'_2 priključni

Najmanja dubina ukopa kanala ovisi o mogućnosti gravitacijskog priključka podruma zgradu, odnosno najnižih izljevnih mesta, o zaštitu kanala od smrzavanja i prometnog opterećenja, te o mogućnosti izvedbe poprečnih spojeva ostalih komunalnih instalacija iznad tjemena kanala. Dubina ukopa kanala ne bi smjela biti manja od 1,5 m. Najveća dubina ukopa kanala ovisi o hidrogeološkim prilikama i iznosi 7,0–8,0 m.

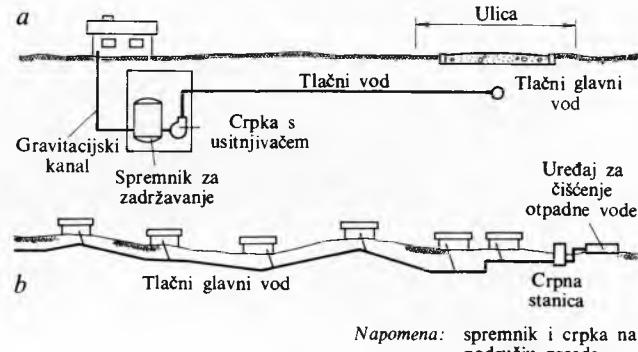
Najveći razmak ulaznih (revizijskih) okana na ravnim dionicama kanala određuje se prema poprečnom presjeku kanala, odnosno prema mogućnosti pregleda, čišćenja i održavanja kanalizacijske mreže.

Razmak okana neprohodnih kanala (promjera do 0,6 m) iznosi 40–50 m. Kad se kroz kanale može puzati (promjeri 0,6–1,4 m), razmak je okana 50–80 m, a za prohodne kanale (promjer veći od 1,4 m) najveći razmak iznosi 100–150 m.

Kanalizacijske mreže s unutrašnjim tlakom

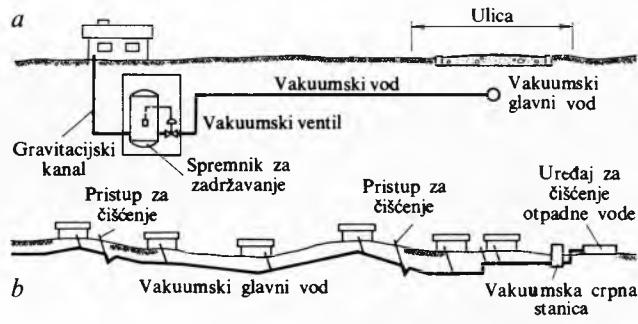
U područjima s nepovoljnim topografskim prilikama, kad je visoka razina podzemne vode ili kad su nepovoljne geomehaničke prilike, grade se kanalizacijske mreže s unutrašnjim tlakom, i to samo za odvodnju otpadnih voda. Uvijek je, međutim, potrebno utvrditi gospodarsku opravdanost takve kanalizacije.

Tlačna kanalizacija (sl. 7) prepostavlja održavanje pretlaka u kanalizacijskoj mreži. Kućne kanalizacije jedne ili više zgrada iz kojih se voda odvodi gravitacijski su priključene na sabirni spremnik. Iz spremnika se otpadna voda potiskuje crpkama s usitnjivačima u glavni tlačni sakupljač. Budući da su sve otpadne tvari usitnjene i da su u tlačnom glavnem sakupljaču brzine tečenja relativno velike, moguće je smanjiti poprečni presjek uličnih kanala. Tlačnu kanalizaciju moguće je primijeniti i za priključak građevina nižih od glavnog sakupljača gravitacijske kanalizacije. Tako se smanjuje dubina ukopa uličnih kanala, jer se ne predviđa gravitacijski priključak pojedinih iznimno nisko smještenih građevina.



Napomena: spremnik i crpka na području zgrade

Sl. 7. Shema tlačne kanalizacije: a) kućni priključak, b) tlačni odvodni sustav



Napomena: spremnik i crpka na području zgrade

Sl. 8. Shema vakuumskog kanaliziranja: a) kućni priključak, b) vakuumski odvodni sustav

Vakuumsku kanalizaciju (sl. 8) slična je tlačnoj s obzirom na temeljnju shemu, s razlikom da se u uličnim kanalima održava tlak manji od atmosferskoga. U sabirnim spremnicima pojedinih zgrada ili grupe zgrada umjesto crpke postavlja se zatvarač posebne izvedbe. Vakuumski zatvarač otvara se kad se sakupi određena količina otpadne vode u spremniku. Zatvarač se zatvara nakon što je usisana otpadna voda i tako se održava sniženi tlak u kanalizacijskoj mreži. Središnja crpna vakuumsku stanicu kojom se održava sniženi tlak u mreži smještena je obično blizu uređaja za čišćenje otpadnih voda.

Gradićne kanalizacijske mreže

Kanalizacijski podsustav sastavljen je od cijevnih vodova i građevina posebne namjene: ulazna (revizijska, kontrolna) okna, priključne građevine, okna za prekid pada, preljevne građevine, spremnici za oborinsku vodu i crpne stanice.

Cijevni vodovi (kanali) jesu osnovni dijelovi svake kanalizacijske mreže. Kanalizacije se u načelu grade kao zatvorene, podzemne građevine, a samo se iznimno pojedini dijelovi kanala (najčešće izvan naseljenih mesta) izvode kao otvoreni tokovi.

Kanalizacijske mreže grade se za razdoblje od 50 i više godina, pa je potrebno da su cijevni vodovi (kanali) izvedeni od čvrstih materijala otpornih na pritisak zemljišta i prometnog opterećenja, te na povremenim unutrašnjim tlakom. Otpadne vode

sadrže i krute mineralne tvari (pijesak), pa cijevi moraju biti otporne i na habanje.

Kanali moraju biti vodonepropusni, kako bi se sprječilo onečišćenje podzemnih voda istjecanjem otpadnih voda i kako bi se onemogućilo procjedivanje podzemnih voda u kanal jer se tako smanjuje propusna moć kanala i povećavaju pogonski troškovi.

Otpadne vode mogu sadržati tvari koje nagrizaju stjenke kanala, pa cijevi moraju biti otporne na agresivne otpadne podzemne vode.

Stjenke kanala moraju biti glatke, a spojevi izvedeni tako da hidraulički otpori budu što manji kako bi se s malim hidrauličkim gubicima postigli povoljni uvjeti tečenja. Materijali koji se najčešće upotrebljavaju za gradnju kanala jesu keramika, beton, armirani beton, azbestni beton, polivinilklorid, polietilen, poliester, lijevano željezo i čelik. Materijal cjevovaoda odabire se na temelju gospodarske analize, ali uz uvjet da budu zadovoljeni navedeni kriteriji.

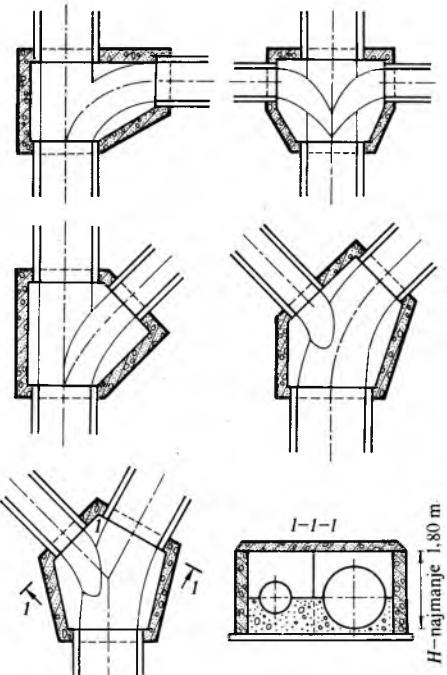
Ulažna (revizijska) okna omogućuju pregled, čišćenje i održavanje kanala. Ulažna okna postavljaju se na svim mjestima gdje se mijenja presjek, pad dna i smjer kanala, te na većim ravnim potezima tako da njihov razmak ne bude veći od maksimalno dopuštenoga.

Ulažno okno sastoji se od silaznog dijela i radnog prostora (komore) (sl. 9 i 10). Silazni dio mora biti toliko velik da radnik može proći (najmanji otvor $0,6 \dots 0,7$ m), a radni prostor treba biti tolik da omogućuje upotrebu potrebnog alata. Najmanji promjer radnog prostora iznosi 1,0 m, a povoljnije je predviđiti promjer od 1,2 m. Visina radnog prostora ovisi o dubini kanala i tipu okna, a preporučuje se da bude $\sim 1,8$ m. Ulažna okna grade se od betona i armiranog betona, a često se postavljaju montažna okna od betona ili azbestnog betona.

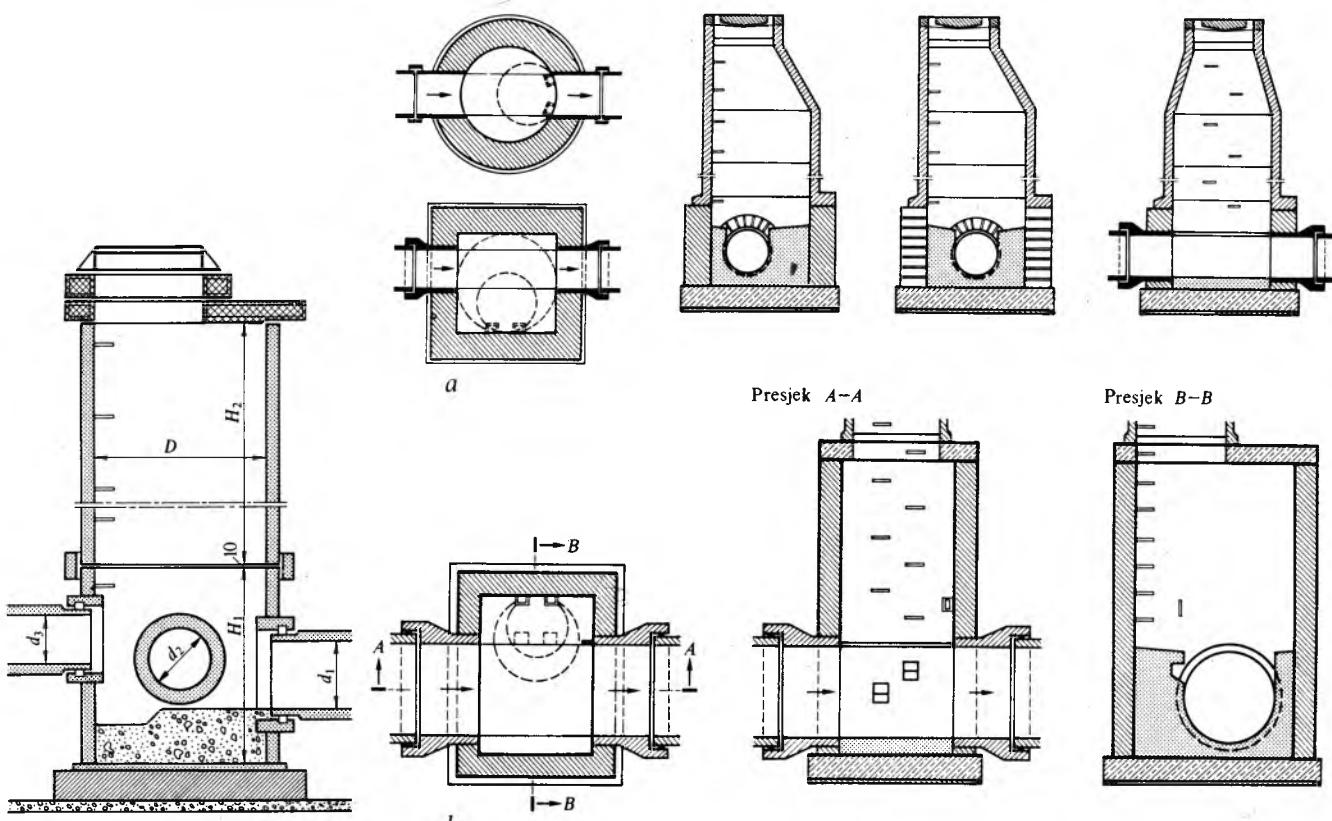
Priklučne građevine grade se na spoju dvaju ili više kanala (sl. 11). U načelu pojedine tokove treba tako voditi da se ne uništi energija i da su pjezometarske linije svih kanala na istoj visini. Kanali se spajaju bez oštih skretanja i mrtvih kutova gdje bi voda mogla mirovati. Kad se spajaju veći presjeci kanala, priključna je građevina proširenje kanala, a

izvodi se od armiranog betona. Kanali manjih presjeka spajaju se u dnu ulaznih okana. Kučni priključci poseban su tip priključnih građevina (sl. 12).

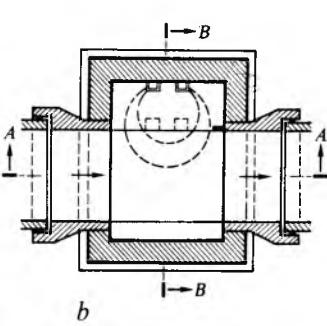
Okna za prekid pada grade se na strmim terenima gdje je nagib zemljišta veći od nagiba dna kanala. Na mjestima gdje se prekida kontinuirani pad dna kanala za više od 0,5 m grade se posebna okna. Za kanale otpadne vode (promjera 0,3 m) mogu se primijeniti okna za prekid pada od fazonskih komada (sl. 13). Za veće presjekte kanala, što je često u oborinskoj i mje-



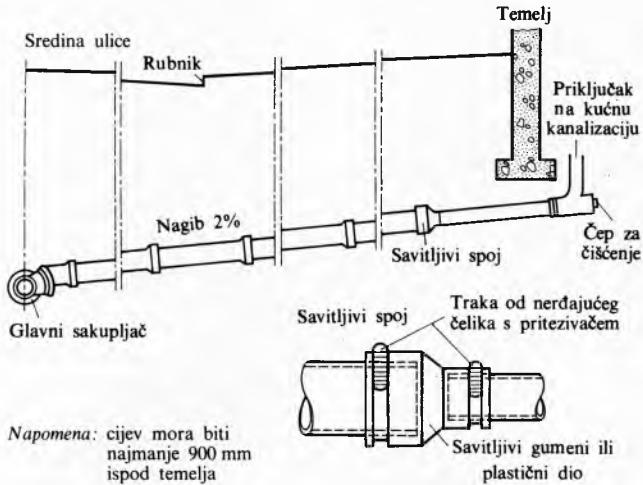
Sl. 11. Primjeri izvedbe priključnih građevina



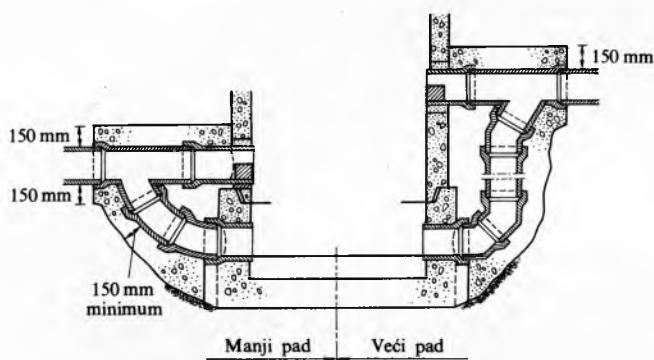
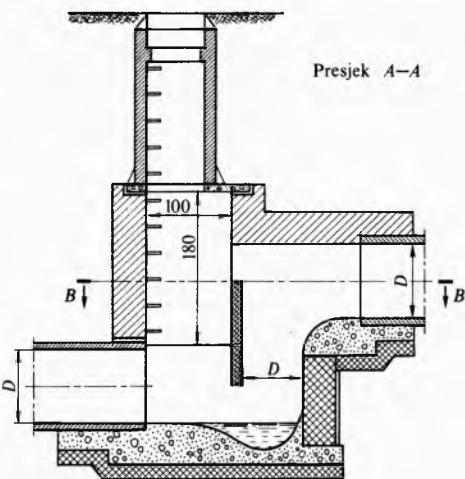
Sl. 9. Montažno ulazno okno. Promjer okna $D = 700 \dots 1500$ mm, promjer cijevi $d = 100 \dots 1100$ mm



Sl. 10. Zidana ulazna okna: a ulazna okna malog promjera s okruglim i pravokutnim tlocrtom, b ulazno okno velikog promjera

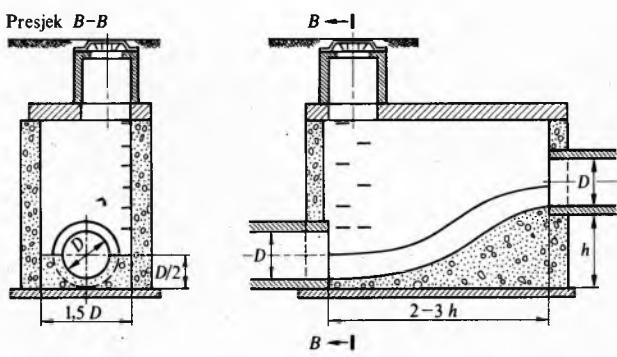


Sl. 12. Kućni kanalizacioni priključak



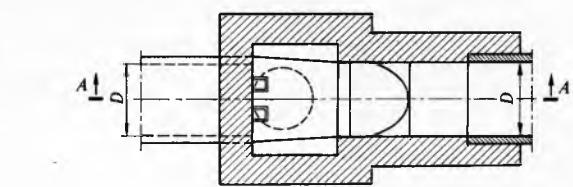
Sl. 13. Okno za prekid pada od fazonskih komada

šovitoj kanalizaciji, grade se posebna okna s kontinuiranim padom dna (sl. 14). Za vrlo velike presjeke kanala (promjeri veći od 1,0 m) odnosno kad je prekid visina veći od 1,5 m, treba predvidjeti posebne elemente za poništenje energije (sl. 15). Takve se građevine hidraulički ispituju na modelima. Građevina za prekid pada dna kanala gradi se od armiranog betona.

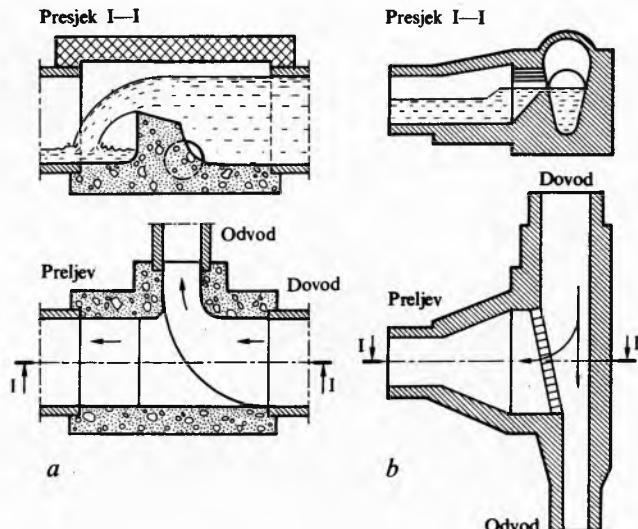


Sl. 14. Okno s kontinuiranim padom

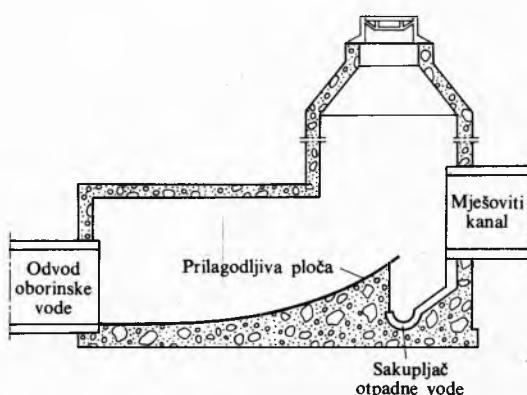
Preljevne građevine (kišni preljevi) primjenjuju se za mješovitu i polurazdjelnu odvodnju. One služe da se smanji dotok oborinskih voda u uređajima za čišćenje ili crpnim stanicama. Preljev nastaje nakon povećanog dotoka oborinske vode te se veći dio oborinske vode (i otpadne vode u mješovitoj odvodnji) ispušta u prijamnik, a manji dio oborinske vode s otpadnom vodom u uređaj za čišćenje (sl. 16). Kišni preljevi dimenzioniraju se tako da se u uređaj dovodi najmanje 90% prosječne godišnje količine organske tvari, mjereno prema BPK-5, i oko 95% tvari koje se talože.



Sl. 15. Okno za prekid pada s poništavanjem energije



Sl. 16. Kišni preljevi: a) okomiti i b) bočni preljev



Sl. 17. Poskočni preljev

Kad se određuje položaj kišnih preljeva u kanalizacijskoj mreži, potrebno je utvrditi učestalost preljeva, trajanje preljeva, količinu preljevne vode, količinu otpadne tvari u preljevnoj vodi, te sanitarne i ekološke prilike u prijamniku preljevne vode. Za mješovitu odvodnju preljevni su pragovi tangencijalni ili okomiti na ulazni tok s prigušenjem ili bez njega u odvodnom kanalu (sl. 16).

Za odvajanje prvih oborinskih voda u polurazdjelnoj odvodnji upotrebljavaju se poskočni preljevi (sl. 17). Preljevne su građevine često vrlo složene. Grade se od armiranog betona, a za njihovo oblikovanje, kad se računa s većim količinama otpadnih i oborinskih voda, preporučuje se ispitivanje na modelima.

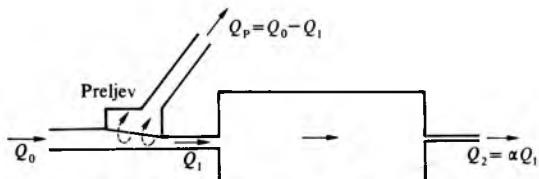
Spremnići za oborinsku vodu mogu biti zadržni i preljevni, te spremnići za bistrenje.

Zadržni spremnici pune se za vrijeme oborina dijelom otpadne i oborinske vode, a prazne postupno nakon prestanka oborina. Iz tih spremnika voda se ne ispušta u prijamnike (sl. 18).



Sl. 18. Shema zadržnog spremnika ($\alpha < 1$)

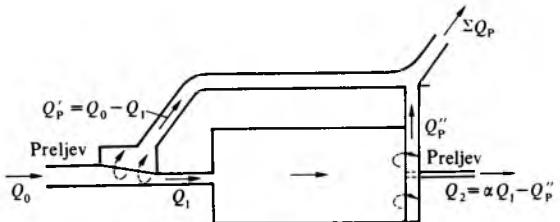
Preljevni spremnici dopuna su preljevnih građevina. Spremnići se dimenzioniraju tako da prihvate dio oborinskih i otpadnih voda prije početka preljevanja, zadrže ih do prestanka oborina, a zatim se spremnici postupno prazne (sl. 19). Pomoću tih građevina poboljšava se kvaliteta preljevne vode, pa se tako



Sl. 19. Shema preljevnog spremnika ($\alpha < 1$)

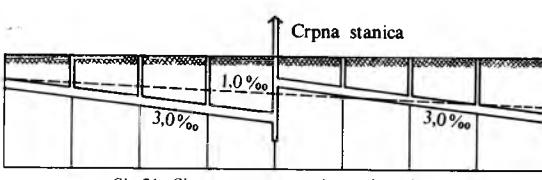
smanjuje opterećenje prijamnika otpadnom tvari i osigurava jednoličnije hidrauličko opterećenje kanalizacijske mreže nizvodno od preljeva uređaja za pročišćavanje. Odvodni kanal dimenzionira se prema dvostrukom dotoku vode u suhom razdoblju (suhu dotok).

Spremnići za bistrenje vode (sl. 20) služe za mehaničko čišćenje oborinskih voda.

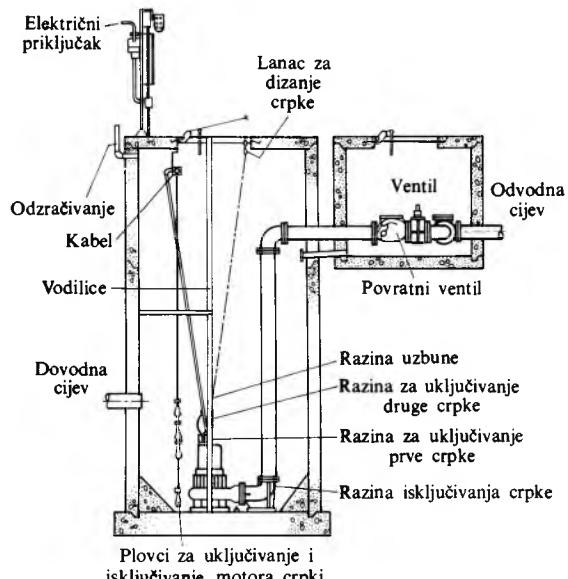


Sl. 20. Shema spremnika za bistrenje

Crpne stanice u kanalizacijskoj mreži potrebne su za podizanje vode iz dubljih u pliću dijelove kanala kad je pad kanala veći od nagiba zemljista (sl. 21). Crpne stanice služe za podizanje vode iz građevina ili područja koja su niža od kanala s



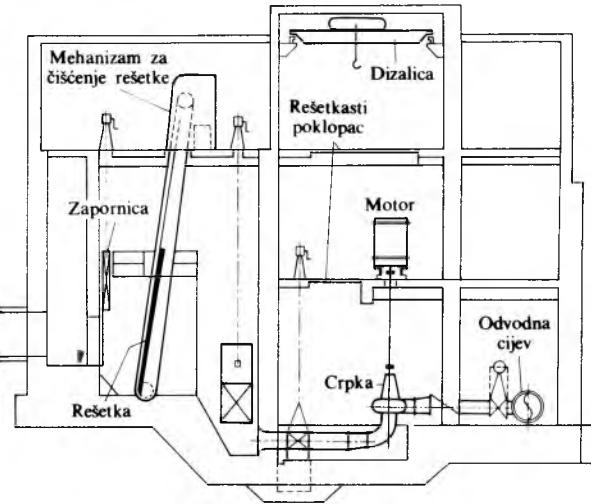
Sl. 21. Shema crpne stанице u kanalu



Sl. 22. Mokra ugradba crpne stанице

gravitacijskim pogonom, odnosno za dovođenje oborinskih voda u prijamnike s povиšenom razinom vode.

S obzirom na sastav otpadnih voda u kanalizaciji se upotrebljavaju crpke u kojima je smanjena mogućnost začepljenja. Crpke u kanalizacijskoj mreži moraju biti otporne na habanje i koroziju. Upotrebljavaju se centrifugalne, propelerne i pužne crpke (v. Pumpne). Prema smještaju crpke u crpnoj stanicici razlikuju se mokra (sl. 22) i suha ugradba (sl. 23).



Sl. 23. Suha ugradba crpne stанице

Zbog nejednoličnog dotoka otpadne ili oborinske vode u crpnim stanicama grade se spremnici za zadržavanje vode (crpni spremnici). Vrijeme zadržavanja otpadne vode u spremnicima ne smije biti dugo (10–25 minuta), kako bi se izbjegla razgradnja organske tvari i tako izbjegli neugodni mirisi. Crpke se uključuju i isključuju automatski prema razini vode u spremniku. Problem jednolikog dotjecanja vode u većim crpnim stanicama može se riješiti ugradnjom više crpki, koje se uključuju prema dotoku. U malim crpnim stanicama u kojima se ugrađuju dvije crpke (radna i rezervna) postoji opasnost od prečestog uključivanja crpki, pa je radni ciklus potrebno utvrditi kao funkciju dotoka otpadne vode.

Prema veličini crpne stаницe i sastavu otpadne vode pred crpnim spremnikom ugrađuju se rešetke ili usitnjivači radi zaštite crpki od začepljenja. Razmak između rešetki iznosi 75–100 mm, kako bi se na minimum smanjilo zadržavanje otpadnih, i pogotovo organskih tvari na rešetki.

Brzina vode kojom se osigurava samočišćenje tlačnog voda iznosi $1,1 \dots 1,5$ m/s.

Tlačne vodove potrebno je ispitati na *vodni udar* (v. *Mehanika fluida*, TE 8, str. 157) te po potrebi predviđjeti njihovu zaštitu od povišenja tlaka koje se može pojaviti.

ČIŠĆENJE OTPADNIH VODA

Čišćenje (kondicioniranje, tretiranje) otpadnih voda postupak je za smanjenje onečišćivača do onih količina ili koncentracija s kojima pročišćene otpadne vode ispuštene u prirodne воде sustave postaju neopasne za život i ljudsko zdravlje i ne uzrokuju neželjene promjene u okolišu.

Čišćenje otpadne vode obuhvaća niz operacija i postupaka kojima se iz vode uklanjuju tvari koje plivaju, suspenzije, koloidi i otopljene tvari, odnosno tvari koje mijenjaju svojstva otpadne vode.

Temeljni su postupci čišćenja fizikalno-kemijski i biološki postupci. Tim temeljnim postupcima čišćenja najčešće prethodi poboljšanje kvalitete otpadne vode (smanjenje količina krupnih plivajućih, suspendiranih i masnih tvari) kako bi se uklonile one tvari koje bi mogle oštetiti uređaje za fizikalno-kemijske ili biološke postupke.

Za čišćenje industrijskih i komunalnih otpadnih voda primjenjuje se metoda izjednačivanja (egalizacije) otpadnih voda.

Navedeni postupci prethodnog čišćenja nazivaju se mehaničkim ili fizikalnim postupcima, iako neki od njih imaju karakteristike fizikalno-kemijskih postupaka (sl. 24).

Filtar primijenjen je prvi put u Engleskoj 1893. god. Biološki postupak čišćenja aktivnim muljem razvijan je u Engleskoj od 1914. god. (Ardern i Lockett). Fizikalno-kemijski postupci čišćenja otpadnih voda razvijali su se za potrebe čišćenja industrijskih otpadnih voda.

Od polovice XX st. naglo se razvijala kemijska industrija, pa se od tada biološki teško razgradljivi i nerazgradljivi spojevi sve više pojavljuju u otpadnim vodama industrije, poljoprivrede i stambenih naselja.

Uz mnoge poznate postupke, kao što su inverzna osmoza, adsorpcija, ionska izmjena, kemijska precipitacija, još uvek se istražuju nove mogućnosti za čišćenje otpadnih voda.

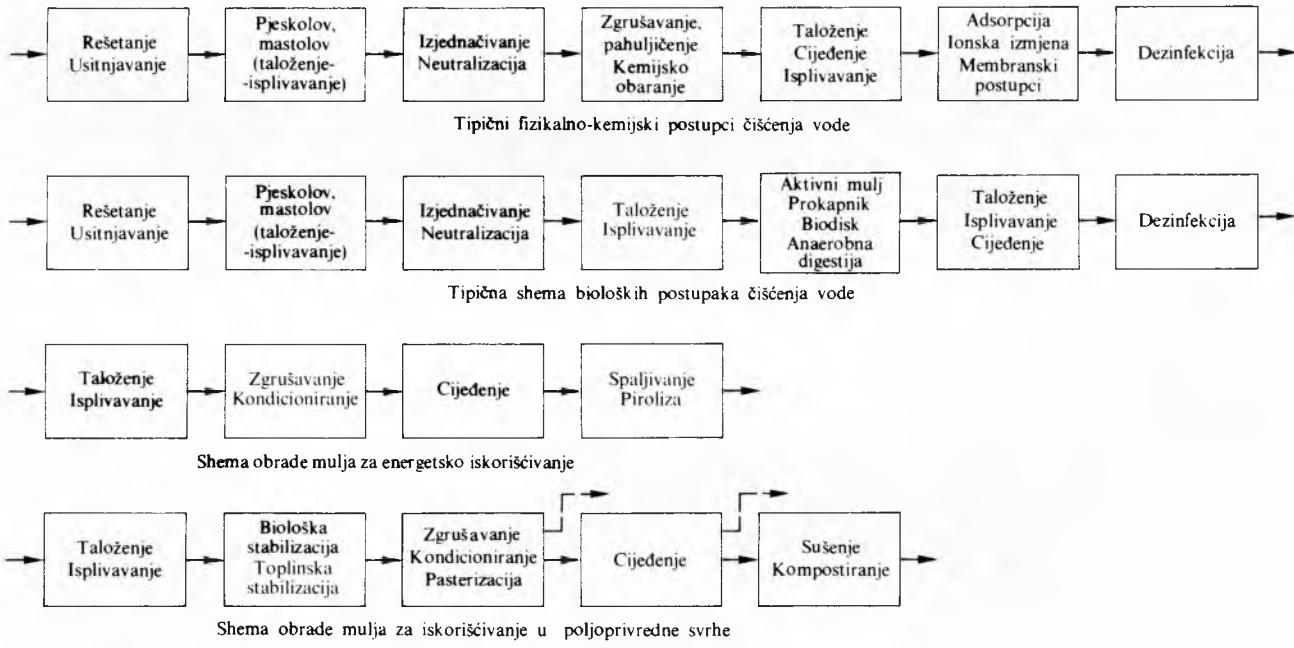
Za razvoj postupaka čišćenja otpadnih voda sedamdesetih i osamdesetih godina našeg stoljeća karakteristični su sljedeći ciljevi: smanjenje nepoželjnih učinaka otpadne tvari na okoliš, ponovno iskoristenje otpadne tvari kao sekundarne sirovine i istraživanje tehnoloških postupaka s najmanjom potrošnjom energije.

Čišćenje otpadnih voda, kao dio općeg napora za zaštitu okoliša, utječe na raspodjelu narodnog dohotka. Zbog troškova gradnje i održavanja uređaja primjena čišćenja otpadnih voda ovisi o stupnju razvijenosti zemlje. U nas je gradnja uređaja za čišćenje otpadnih voda tek u razvojnoj fazi, pa od većih gradova jedino Sarajevo ima izgrađen uređaj za čišćenje gradskih otpadnih voda.

Mehanički postupci

Izdvajanje na rešetkama (rešetanje). Na rešetkama se uklanjuju krupne tvari (lišće, krpe, plastika, komadići drveta) koje bi mogle smetati radu crpki i drugih dijelova uređaja.

Učinak postupka ovisi o slobodnom otvoru među šipkama rešetke. Prema razmaku među šipkama rešetke razlikuju se grube



Sl. 24. Schemi čišćenja otpadne vode

Uklanjanjem suspendirane, koloidne i otopljene tvari iz vode dobiva se koncentrirani otpad koji se zove *mulj*. Sirovi mulj neugodna je izgleda i mirisa, opasan za ljudsko zdravlje i okoliš, te se ne smije ispuštati iz uređaja za čišćenje prije prethodne obradbe. Mulj se obrađuje fizikalno-kemijskim, biološkim i termičkim postupcima.

Razvoj postupaka čišćenja otpadnih voda počinje u XIX stoljeću, iako su postupci ispuštanja otpadnih voda u lagune bili poznati i primjenjivani u Aziji već više stoljeća.

Kochova i Pasteurova otkrića upozorila su na opasnost od otpadnih voda. Međusobna veza otpadnih voda i zaraznih bolesti naslučivana je i ranije, ali su se tek razvojem mikrobiologije mogli utvrditi patogeni mikroorganizmi, njihovo porijeklo, mogućnost razvoja i prijenosa otpadnim vodama.

Postupak anaerobne razgradnje istraživan je od 1850. godine, a prvi digestor napravio je 1860. godine H. Mouras u Francuskoj. D. Cameron je opazio metan u plinovima koji su nastali anaerobnom razgradnjom pri gradnji prvog spremnika za anaerobnu razgradnju u Engleskoj 1895. god. On je sakupio plin i iskoristio ga za javnu rasvjetu u blizini uređaja. Prokapnik ili biološki

rešetke s razmakom $50 \dots 100$ mm, srednje rešetke s razmakom $10 \dots 25$ mm i fine rešetke s razmakom $3 \dots 10$ mm.

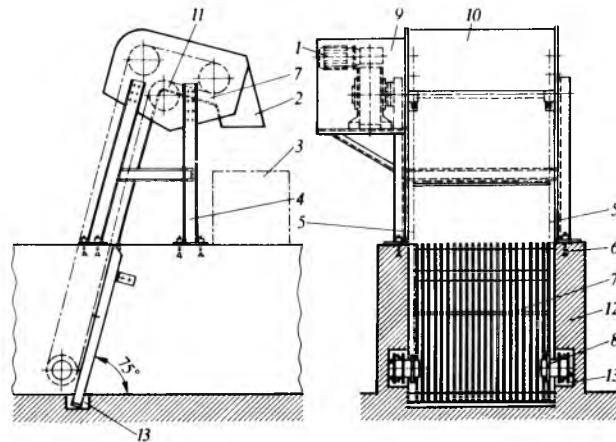
Na finim rešetkama zauštavlja se i dio suspendirane tvari organskog i anorganskog porijekla. Učinak čišćenja na finim rešetkama iznosi: smanjenje sadržaja BPK-5 za $3 \dots 10\%$, suspendirane tvari za $2 \dots 20\%$, bakterija za $10 \dots 20\%$, a KPK za $5 \dots 10\%$. Rešetke se čiste ručno ili mehanički (sl. 25). Ručno se čiste rešetke u malim postrojenjima i grube rešetke koje se postavljaju kao zaštita srednjih i finih rešetaka u većim uređajima.

Sirina rešetke računa se prema izrazu

$$b_r = \frac{Q(s+e)}{h \cdot v \cdot e}, \quad (16)$$

gdje je Q protok (m^3/s), s debljina šipke rešetke (mm), e raz-

OTPADNE VODE



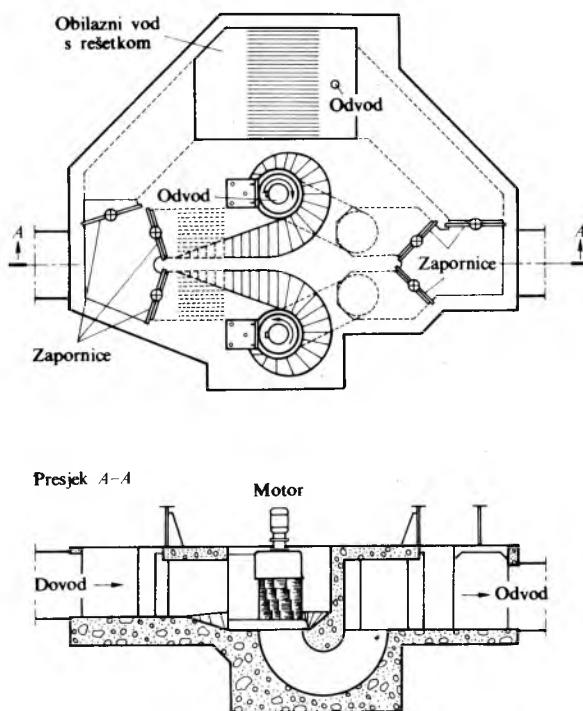
Sl. 25. Rešetka s mehaničkim čišćenjem. 1 pogonski motor (0,75 kW), 2 izlazni ljevak, 3 sanduk za otpatke, 4 nosač, 5 lanac, 6 pričvrsni vijak, 7 češalj za čišćenje rešetke, 8 dulji lančanik, 9 poklopac pogonskog motora, 10 poklopac gornjih lančanika, 11 pogonski lančanik, 12 zid kanala, 13 ležiste rešetke

mak među šipkama (mm), h dubina vode u kanalu (m), v brzina vode (m/s) a f stupanj zapunjena rešetke.

Minimalna brzina vode u kanalu treba da bude 0,6 m/s da bi se izbjeglo taloženje otpadne tvari, ali je povoljnije kad je brzina 1,0–1,5 m/s. Stupanj zapunjena iznosi 0,9. Gubici visine pri protjecanju vode kroz rešetku iznose 0,10–0,40 m.

Usitnjavanje (dezintegracija) otpadne tvari postupak je koji zamjenjuje rešetanje. Usitnjene i isječene otpadne tvari odvode se na dalje čišćenje bez opasnosti od začepljenja crpki i drugih dijelova uređaja. Tako se izbjegava sakupljanje i odvoz krupne tvari s rešetke, što je uvjek neugodno zbog ružna izgleda i smrada. Krupne tvari usitnuju se u čestice veličine 3–8 mm.

Upotrebljavaju se dva tipa usitnjivača: usitnjivači sa slobodnim prolazom vode (sl. 26) i u obliku crpki. Gubitak visine na usitnjivaču sa slobodnim prolazom iznosi 0,1–0,3 m.



Sl. 26. Usitnjivač sa slobodnim prolazom vode

Izjednačivanje (egalizacija) je zadržavanje otpadne vode u spremniku da se izjednače temeljna svojstva vode (koncentracija vodikovih iona, odnosno vrijednost pH, zatim boja, mutež,

konzentracija BPK, KPK i dr.). Dodatni učinak nastaje zbog fizikalnih, kemijskih i bioloških promjena tijekom zadržavanja. U načelu postupak izjednačivanja primjenjuje se za industrijske otpadne vode. Vrijeme zadržavanja ovisi o tehnološkom postupku u industriji, odnosno o ciklusu ispuštanja otpadnih voda iz pojedinih pogona, ali ne može biti kraće od trajanja cjelokupnog ciklusa. Da bi se spriječilo taloženje u spremniku za izjednačivanje i da bi se postiglo bolje miješanje vode, upotrebljavaju se mehaničke miješalice i primjenjuje se ozračivanje (aeracija). Dodavanjem zraka, osim miješanja i sprečavanja taloženja, potpomaže se kemijska i biološka oksidacija otpadne tvari.

Fizikalno-kemijski postupci

Taloženje (sedimentacija) je postupak uklanjanja krutina iz tekućine gravitacijom. Razlikuju se dva tipa krutina: a) zrnate čestice koje se talože pojedinačno i uz konstantnu brzinu i b) pahuljičaste čestice (flokule) koje se talože brzinom koja ovisi o veličini pahuljice.

Na zrnatu česticu koja je gušća od vode djeluju sila teže i otpor tekućine, odnosno sila trenja.

Sila teže određuje se iz izraza

$$F_g = (\varrho_s - \varrho) g V_s, \quad (17)$$

a sila trenja koja koči taloženje iz izraza

$$F_t = \frac{1}{2} C_t A_s \varrho v_s^2, \quad (18)$$

gdje je ϱ_s gustoća zrnate čestice, ϱ gustoća vode, g ubrzanje Zemljine teže, V_s obujam zrnate čestice, C_t koeficijent trenja ovisan o Reynoldsovoj značajci (sl. 27), A_s površina presjeka čestice okomito na smjer taloženja, a v_s brzina taloženja čestice. Ako je vrijednost Reynoldsove značajke (Re) manja od 1, koeficijent trenja iznosi $C_t = 24/Re$.

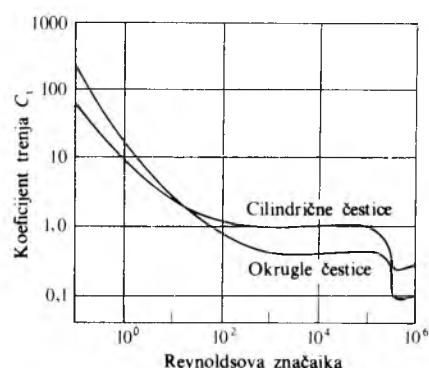
Izjednačenjem obiju sila čestica će se taložiti konstantnom brzinom koja iznosi

$$v_s = \left(\frac{2g}{C_t} \cdot \frac{\varrho_s - \varrho}{\varrho} \cdot \frac{V_s}{A_s} \right)^{1/2}. \quad (19)$$

Za česticu u obliku kugle brzina je taloženja (prema Stokesu)

$$v_s = \frac{g}{18} \cdot \frac{\varrho_s - \varrho}{\eta} D_s^2, \quad (20)$$

gdje je η dinamička viskoznost vode (Pas), a D_s promjer kugle (m).



Sl. 27: Koefficijent trenja (C_t) pri taloženju zrnatih čestica

Promatra li se taloženje u idealnom pravokutnom taložniku gdje postoji stalni horizontalan tok vode i konstantna brzina taloženja čestica, na svaku će česticu djelovati brzina taloženja v i horizontalna brzina toka v_H (sl. 28). Čestica će brzinom v_0 za vrijeme t prevaliti put h_0 i istaložit će se, pa je brzina taloženja

$$v_0 = \frac{h_0}{t}, \quad (21)$$

Brzina je protjecanja v_H kroz taložnik

$$v_H = \frac{Q}{bh_0}, \quad (22)$$

gdje je b širina taložnika. Raspoloživo vrijeme taloženja iznosi

$$t = \frac{l}{v_H}, \quad (23)$$

gdje je l duljina taložnika.

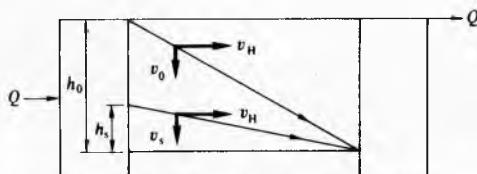
Uvrštenjem u jednadžbu (20) dobiva se

$$v_0 = \frac{h_0 v_H}{l} = \frac{h_0}{l} \cdot \frac{Q}{b h_0} = \frac{Q}{A}, \quad (24)$$

gdje je A površina vode. Omjer Q/A naziva se površinskim opterećenjem taložnika. Kritična brzina taloženja u idealnom taložniku ne ovisi o dubini taložnika ni o vremenu zadržavanja. Ako se poveća horizontalna brzina protjecanja v_H , mogu se podignuti već istaložene čestice koje će voda ponijeti sa sobom. Kritična brzina pri kojoj se čestice vraćaju u suspenziju iznosi

$$v_t = \left(\frac{8\beta}{f} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} D_s \right)^{1/2}, \quad (25)$$

gdje je β koeficijent koji iznosi 0,08 za pijesak, 0,06 za raznovrsne čestice, a 0,04 za mulj, dok je f koeficijent trenja kojemu je srednja vrijednost 0,03.



Sl. 28. Taloženje čestica u idealnom pravokutnom taložniku

Brzina taloženja pahuljičastih čestica povećava se s povećanjem pahuljica koje nastaju spajanjem dviju ili više čestica. Učinak pahuljičastog taloženja ne ovisi samo o površinskom opterećenju već i o vremenu zadržavanja. Dulji i dublji taložnici su povoljniji, jer se produljenjem puta povećava mogućnost pahuljičenja (sl. 29). Ne postoji matematički model za opis taloženja pahuljičastih čestica. Prema Kynchovoj teoriji brzina taloženja pahuljica ovisi jedino o lokalnoj koncentraciji pahuljičastih čestica. Na temelju te spoznaje proračun taložnika temelji se na opterećenju krutinama (kg/m^2) suspendiranih tvari u jedinici vremena.

Postupkom taloženja zrnatih čestica izdvaja se pijesak iz otpadne vode. Pjeskolov u kojem se taloži pijesak uobičajeni je uređaj za prethodno čišćenje komunalnih otpadnih voda, pogotovo ako se u uređaj dovodi i dio oborinskih voda. Pjeskolov se dimenzionira prema površinskom opterećenju, odnosno

prema brzini taloženja zrna pijeska prepostavljene veličine (tabl. 8).

Tablica 8
BRZINA TALOŽENJA ČESTICA PIJESKA GUSTOĆE 2650 kg/m^3

Promjer čestice m	Brzina taloženja uz horizontalnu brzinu $0,3 \text{ m/s}$ m/s	Brzina taloženja uz kritičnu horizontalnu brzinu m/s	Kritična horizontalna brzina m/s
0,0001	0,000	0,005	0,20
0,0002	0,016	0,017	0,27
0,0004	0,045	0,04	0,38
0,001	0,13	0,11	0,60
0,002	0,25	0,21	0,83
0,003	0,33	0,26	1,0
0,005	0,45	0,33	1,3
0,01	0,65	—	1,9

Postupak taloženja primjenjuje se za smanjenje anorganske i dijela organske suspendirane tvari. Taloženje, kao jedan od prvih postupaka čišćenja sirove otpadne vode, provodi se u prethodnim (primarnim) taložnicima.

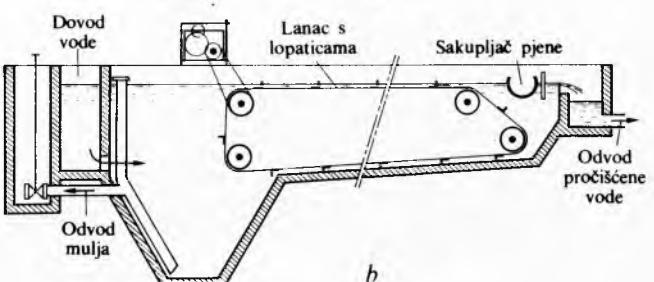
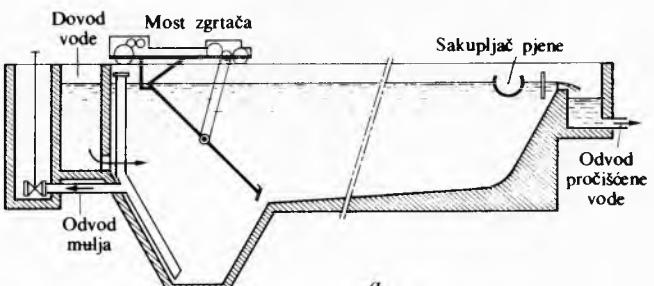
Učinak čišćenja sirove komunalne otpadne vode u prethodnim taložnicima iznosi približno: 25...40% BPK-5, 40...70% ukupnih suspenzija, 25...75% bakterija i 20...35% KPK.

U otpadnim vodama nalaze se izmiješane suspenzije u obliku zrna i pahuljica. Zbog toga učinak čišćenja u prethodnim taložnicima ovisi i o vremenu zadržavanja vode.

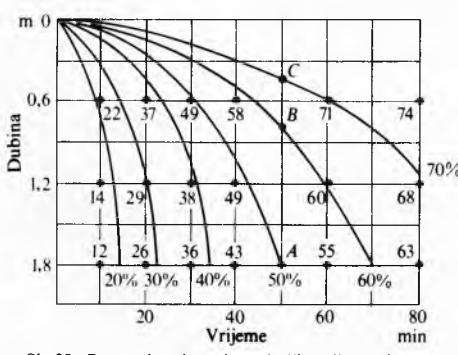
Za komunalne otpadne vode odnos između površinskog opterećenja, vremena zadržavanja i dubine taložnika može se približno odrediti prema podacima u tabl. 9. Za industrijske vode i za komunalne s većim sudjelovanjem industrijskih otpadnih voda podaci za dimenzioniranje taložnika utvrđuju se ispitivanjem na modelima.

Tablica 9
VRIJEME ZADRŽAVANJA KOMUNALNIH OTPADNIH VODA PREMA POVRŠINSKOM OPTEREĆENJU I DUBINI TALOŽNIKA

Površinsko opterećenje po $\text{m}^2/\text{m}^3/\text{h}$	Dubina taložnika, m			
	1,5	2,0	2,5	3,0
Vrijeme zadržavanja, h				
0,80	1,87	2,50	3,12	3,75
1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
1,20	1,25	1,68	2,08	2,50
1,40	1,07	1,42	1,78	2,14
1,60	0,94	1,25	1,56	1,87

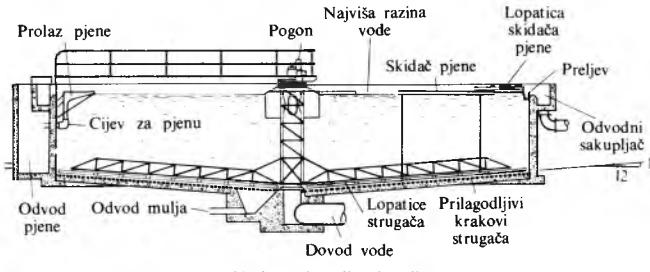


Sl. 30. Prethodni taložnici pravokutnog tlocrta sa zgrtačem mulja: a) taložnik s ravnim zgrtačem, b) taložnik s lančanim zgrtačem



Sl. 29. Postotak taloženja pahuljičastih čestica

OTPADNE VODE



Sl. 31. Okrugli taložnik

Prethodni taložnici imaju pravokutni (sl. 30) ili okrugli tlort (sl. 31). Pravokutni taložnici grade se dugi do 90,0 m i široki do 25,0 m. Omjer duljine i širine iznosi 3:1 do 6:1. Optimalni omjer dubine i duljine pravokutnog taložnika iznosi 1/20...1/35. Okrugli taložnici grade se do promjera 60...75 m i do dubine 2...5 m. Kad je promjer veći od 60 m, utjecaj vjetra je znatan i predstavlja ograničavajući činilac. Optimalni omjer dubine i polumjera iznosi 1/6...1/8.

Prethodni taložnici opremljeni su zgrtačima mulja sa dna i skupljačem plivajućih tvari s vodne površine.

Taloženje pahuljičastog mulja često je posljednji korak čišćenja otpadne vode. Primjenjuje se za bistrenje vode očišćene biološkim ili fizično-kemijskim postupkom, pa se u tu svrhu grade *naknadni taložnici*. Suspenzije su pretežno pahuljičaste, pa učinak bitno ovisi o vremenu zadržavanja vode. Učinak bistrenja vode zavisi o mnogo činilaca, a osobito o udjelu industrijskih otpadnih voda. Za izbor dimenzija naknadnih taložnika za bistrenje industrijskih voda, odnosno otpadnih voda s velikim udjelom industrijskih voda, potrebna su prethodna ispitivanja. Naknadni taložnici najčešće imaju kružni tlort.

Isplivavanje (flotacija) nastaje zbog razlike u gustoći čestica krutine ili kapljica tekućine i vode u kojoj su raspršene. Isplivavanje se odvija prema istim prirodnim zakonima kao i taloženje, samo je kretanje raspršenih čestica u obrnutom smjeru.

Razlikuje se prirodno i stimulirano isplivavanje. Prirodno isplivavaju čestice kad je tekućina gušća od čestice. Stimulirano isplivavanje ostvaruje se pomoću mjehurića plina i zraka koji se lijepe na čestice (veće gustoće), pa se tako postiže da je tekućina prividno gušća od čestica (v. *Flotacija*, TE 5, str. 461).

Učinak izdvajanja plivajućih tvari ovisi o više činilaca: o vremenu zadržavanja, gustoći plivajuće tvari, veličini plivajuće čestice, temperaturi vode, masenom protoku plivajuće tvari i brzini protjecanja.

Učinak prirodnog uklanjanja masnoće iz otpadnih voda uslužnih radionica i restauracija iznosi 80...90% uz zadržavanje vode od 3...5 minuta, pri uzlaznoj brzini od 15 m/h i temperaturi vode do 35 °C. Stimuliranim isplivavanjem može se smanjiti sadržaj plivajućih tvari do 98%. Prirodno isplivavanje masnoća i lakih plivajućih tvari odvija se u svim prethodnim taložnicima koji imaju manju pregradu ispred izlaznog preljeva. U uređajima za stimulirano isplivavanje najčešće se primjenjuje po-

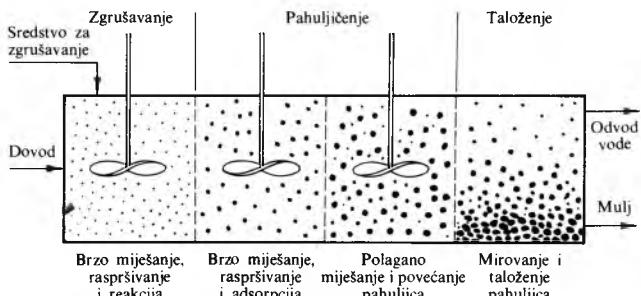
stupak s povećanim tlakom zraka i naknadnim smanjenjem tlaka u spremniku za isplivavanje (sl. 32). Osim pomoću tlaka, moguće je ostvariti isplivavanje pomoću vakuma, kemijskim sredstvima, mehaničkim postupkom i elektrolizom. Postupak isplivavanja upotrebljava se kao prethodno čišćenje komunalnih otpadnih voda umjesto taložnika i kao naknadno bistrenje vode u postupku s aktivnim muljem. Isplivavanje se često primjenjuje za čišćenje industrijskih otpadnih voda iz rafinerija, petrohemiske industrije, tvornica papira, celuloze, margarina i ulja, pivovara, klaonika i tvornica automobila.

Zgrušavanje (koagulacija) sitnih čestica krutine (koloida) nastaje unošenjem u vodu kemijskih reagensa koji destabiliziraju koloidne čestice pojavitju elektrostaticki naboje. Stabilnost koloidne otopine ovisi o ionizaciji koja je nastala rastvaranjem ili adsorpcijom, pri čemu se na površini koloidne čestice pojavitju elektrostaticki naboje. U prirodnim su vodama koloidi uvek negativno nabijeni, a slično je i u većini otpadnih voda. Zbog istoimenih elektrostatickih naboja koloidi se međusobno odbijaju i ostaju raspršeni u vodi (v. *Elektrokinetičke operacije*, TE 4, str. 397). Dodavanjem vodi kemijskih sredstava (koagulanata) kojih ioni reagiraju s električki nabijenim koloidima moguće je poništiti elektrostaticke čestice koloida, te omogućiti zgrušavanje čestica i stvaranje većih pahuljica, koje se mogu izdvojiti iz tekućine taloženjem, cijeđenjem ili isplivavanjem.

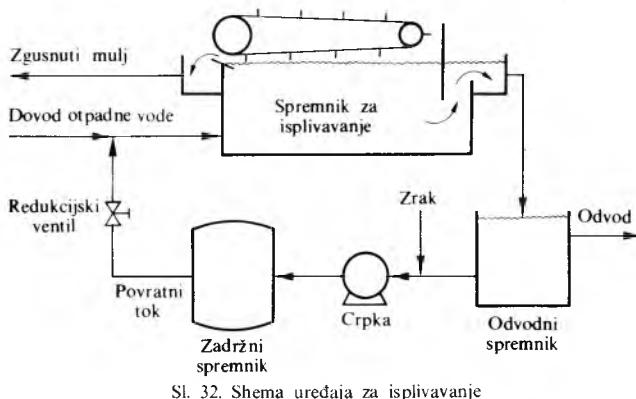
Kao sredstva za zgrušavanje upotrebljavaju se: mineralne soli s polivalentnim kationima i prirodni ili sintetski polimeri (polielektroliti). Od mineralnih soli najviše se upotrebljavaju soli aluminija i željeza: aluminij-sulfat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, aluminij-klorid AlCl_3 , natrij-aluminat NaAlO_2 , željezo(III)-klorid FeCl_3 , željezo-sulfati $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ i FeSO_4 , te bakar(II)-sulfat CuSO_4 .

Kod hidrolize navedeni koagulanti stvaraju teškoće jer mijenjaju fizičko-kemijska svojstva vode (pH , prozirnost). Dodavanjem većih količina koagulanata pojavljuje se prekomjeran višak mulja. Za regulaciju vrijednosti pH često se upotrebljava vapno (kalcij-hidroksid $\text{Ca}(\text{OH})_2$) kao pomoćno sredstvo. Prednost je polielektrolita da su oni topljni u vodi, pa se njihovom upotrebom ne povećava količina mulja. Često se upotrebljavaju kationski polielektroliti, ali su u upotrebi anionski i neionski.

Nakon dodavanja sredstava za zgrušavanje potrebno je brzo miješati koagulant i otpadnu vodu, a zatim osigurati pahuljenje i taloženje (sl. 33).



Sl. 33. Shema procesa zgrušavanja i pahuljenja



Sl. 32. Shema uredaja za isplivavanje

Tablica 10
SREDNJE VRIJEDNOSTI UČINKA SMANJENJA OTPADNE TVARI U KOMUNALNIM OTPADNIM VODAMA BEZ ZGRUŠAVANJA I SA ZGRUŠAVANJEM

Vrsta taložnika	Smanjenje, %					
	fosfat		suspenzija		BPK	
	bez	sa	bez	sa	bez	sa
Prethodni taložnik	5...10	70...90	40...70	60...75	25...40	40...50
Naknadni taložnik						
— prokapnik	10...20	80...95	70...92	85...95	80...90	80...95
— aktivni mulj	10...20	80...95	85...95	85...95	85...95	85...95

Zgrušavanjem se uklanjanju koloidi i fosfati iz komunalnih otpadnih voda (tabl. 10), te koloidi iz otpadnih voda iz industrija papira i čeličana. Istim postupkom smanjuje se količina pjene i masnoće u otpadnim vodama iz rafinerija i čeličana.

Vrsta i količina sredstava za zgrušavanje određuje se ispitivanjem otpadne vode.

Pahuljičenje (flokulacija) postupak je spajanja raspršenih čestica u tekućini u veće pahuljice koje se dalje talože zbog povećane gustoće. Pahuljičenje se primjenjuje nakon zgrušavanja, pa se ponekad oba procesa nazivaju istim imenom. Pahuljičenje se može poboljšati laganim miješanjem tekućine u spremniku, čime se omogućuje učestaliji dodir pahuljica (sl. 33). Brzine strujanja koje nastaju miješanjem ne smiju biti velike da se ne bi razbile već slijepljene pahuljice. Horizontalna brzina strujanja u spremniku obično je $0,15 \dots 0,30$ m/s. Dalje povećanje pahuljica može se postići dodavanjem sredstava za pahuljičenje (flokulanta).

Najstariji je flokulant aktivni silicij, a upotrebljavaju se još bentonit, dijamatska zemlja, neke vrste gline, istaloženi kalcij-karbonat, aktivni ugljen u prahu i sintetski flokulanti. Količina i vrsta flokulanta utvrđuje se ispitivanjem vode.

Cijedenje (filtracija) je propuštanje mješavine krutine i tekućine kroz poroznu cijediljkę (filter). Tada se čvrste tvari zadržavaju na cijediljki, a tekućina (procjedina) prolazi kroz filter (v. *Filtracija*, TE 5, str. 398).

Odstranjivanje krutina temelji se na mehaničkom djelovanju kad su čestice veće od pora cijediljke, adsorpcijskom djelovanju koje ovisi o površinskoj aktivnosti filterskog materijala i stabilnosti koloida (v. *Adsorpcija*, TE 1, str. 1), adhezijskom djelovanju kad se pahuljice pričvršćuju na površinu filterskog materijala, taložnom djelovanju koje ovisi o debljini sloja, veličini šupljina i brzini cijedenja, kemijskom djelovanju koje ovisi o sastavu filtra i biološkom djelovanju kad se stvara biološki film.

Cijedenje se može provesti površinskim i dubinskim filtrima.

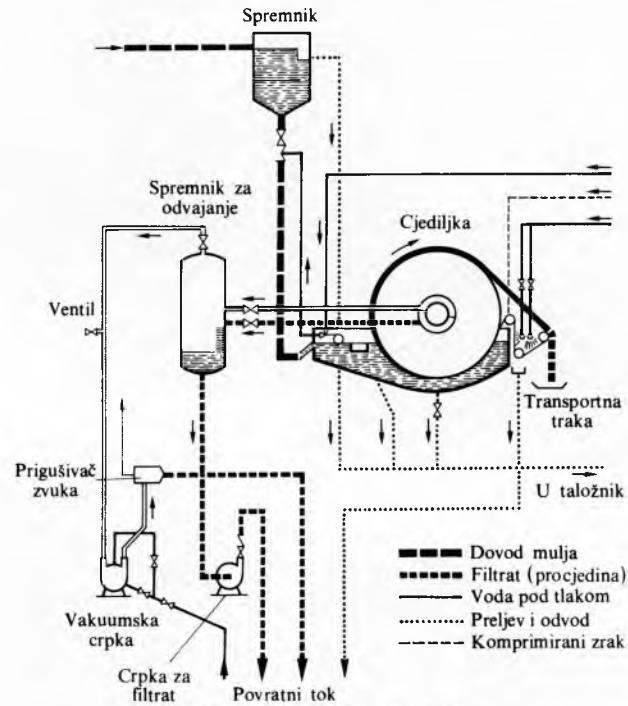
Kao *površinski filtri* upotrebljavaju se mikrosita, platna u obliku traka, filtri pod tlakom ili u podtlaku, zatim ulošci od žarenoga poroznog materijala u obliku okvira, ploča i bubnjeva. Cijedenje kroz površinske cijediljke primjenjuje se za obradbu mulja ili kao završni postupak pročišćavanja otpadnih voda.

U *dubinskim filtrima* filtersko je tijelo sastavljeno od granuliranog materijala. Dugo se vremena cijedenje kroz takvo filtersko tijelo primjenjivalo za čišćenje vodoopskrbne vode, a rijetko, i to s velikim teškoćama, za čišćenje otpadnih voda. Posljednjih dvadesetak godina razvile su se cijediljke s dvostrukim i mješovitim slojevima (krupnozrnnati, sitnozrnnati), te je naglo porasla primjena cijedenja kroz filterski sloj za čišćenje otpadnih voda.

Cijedenje otpadnih voda kroz dubinske cijediljke primjenjuje se u sljedeće svrhe: a) za uklanjanje koloida i pahuljica koji se ne talože nakon kemijskog ili biološkog pahuljičenja; b) za smanjenje suspendirane tvari, muteži, fosfora, BPK, KPK, teških metala, bakterija i virusa; c) za povećanje učinaka dezinfekcije uklanjanjem suspendiranih tvari; d) za zaštitu uređaja za adsorpciju aktivnim ugljenom i povećanje učinka smanjenjem organskog opterećenja; e) za bistrenje vode, što povećava kvalitetu vode u estetskom pogledu; f) za biološku denitrifikaciju primjenom sitnih zrnaca filterskog tijela na koje su pričvršćeni mikroorganizmi.

Mikrosito je mehanička cijediljka u obliku bubnja. Smješteno je u spremnicima i potopljeno je do 2/3 visine. Otpadna tvar ostaje na unutrašnjem dijelu mikrosita i povremeno se ispirje pročišćenom vodom. Veličina je otvora mikrosita $20 \dots 60$ µm. Uobičajena izvedba ima sljedeće karakteristike: opterećenje površine po četvornom metru $2,0 \dots 6,8$ L/s, promjer bubnja $1,5 \dots 3,0$ m, a propusnu moć $40 \dots 400$ L/s. Primjenjuje se za bistrenje vode nakon biološkog pročišćivanja. Učinak ovisi o opterećenju krutinama. Kad se primjenjuje postupak s aktivnim muljem i prokapnikom, može se smanjiti suspendirana tvar za $70 \dots 80\%$ uz istodobno smanjenje BPK za $60 \dots 70\%$.

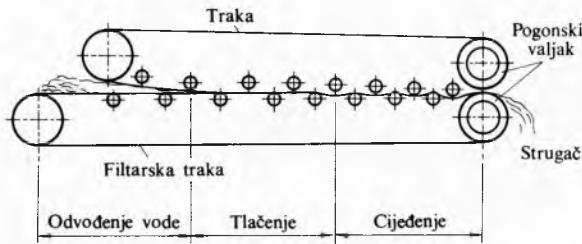
Vakuumski filter sastoji se od bubenja koji se okreće u spremniku s tekućinom za cijedenje. Potopljen je do približno četvrtine promjera (sl. 34). U bubenju koji se okreće stvara se podtlak. Mulj se u tankom sloju lepi na platno s kojeg se cijedi i odstranjuje. Primjenjuje se za cijedenje mulja iz otpadne vode. Postiže se koncentracija suhe tvari u mulju organskog porijekla od $20 \dots 40\%$, a u mulju anorganskog porijekla od $40 \dots 50\%$. Kapacitet je cijediljki po četvornom metru njezine površine $15 \dots 75$ kg/h suhe tvari. Prije cijedenja mulju se dodaju sredstva za zgrušavanje (vapno i željezo-klorid). Potrošnja je energije po toni suhe tvari $50 \dots 150$ kWh.



Sl. 34. Shema vakuumske cijediljke

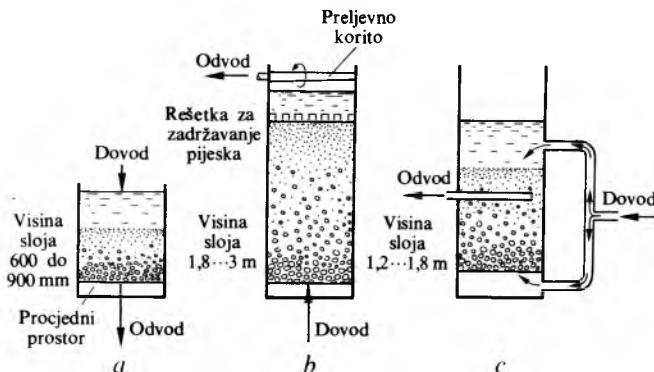
Cijediljke pod tlakom (filterske preše) sastoje se od niza vertikalnih ploča između kojih se nalazi mulj za cijedenje. Pod tlakom $0,6 \dots 1,5$ MPa postiže se koncentracija suhe tvari od $40 \dots 50\%$ kad je mulj organskog porijekla, odnosno od $60 \dots 70\%$ kad je mulj anorganskog porijekla. Cijediljke pod tlakom rade s prekidima (punjenje, pražnjenje), a kapacitet po četvornom metru površine iznosi $2 \dots 10$ kg/h suhe tvari. Kao sredstvo za poboljšanje cijedenja upotrebljavaju se željezo-klorid i vapno. Potrošnja je energije po toni suhe tvari $15 \dots 40$ kWh.

Trakaste cijediljke rade na istim načelima kao i cijediljke pod tlakom. Razlikuju se po tome što trakasta cijediljka radi kontinuirano, a cijedi se pritiskom na mulj između dva pokretna platna (sl. 35). Postotak suhe tvari u ostatku nakon cijedenja kad se cijedi organski mulj iznosi $20 \dots 35\%$, a kad se cijedi anorganski mulj $25 \dots 50\%$. Kapacitet je cijediljke po metru širine trake do 1000 kg/h suhe tvari, što ovisi o porijeklu mulja. Trakaste cijediljke proizvode se s trakom širokom do 3 m. Poboljšanje cijedenja postiže se dodatkom polielektrolita. Potrošnja je energije po toni suhe tvari $5 \dots 20$ kWh.

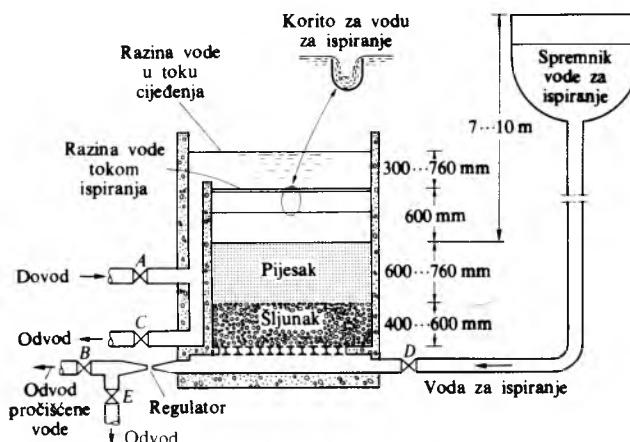


Sl. 35. Shema trakaste cijediljke

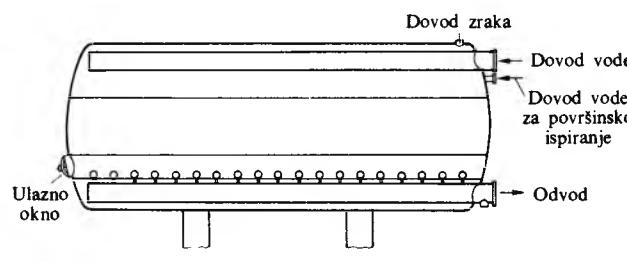
Dubinske cijediljke (filtarska tijela) razlikuju se prema smjeru strujanja u cijediljci: strujanje odozgo naniže, strujanje odozdo naviše, dvosmjerno strujanje (sl. 36). Zatim se razlikuju prema vrsti materijala kojim se puni cijediljka: kremeni pijesak, antracit, mramor, aktivni ugljen. Osim toga, razlikuju se cijediljke s gravitacijskim pogonom (sl. 37) od cijediljaka pod tlakom (sl. 38). Pogodnost materijala za cijeđenje vode procjenjuje se prema veličini i obliku zrna te koeficijentu ujednačenosti. Cijedi se kroz jednoslojno, dvoslojno ili višeslojno filtersko tijelo (sl. 39).



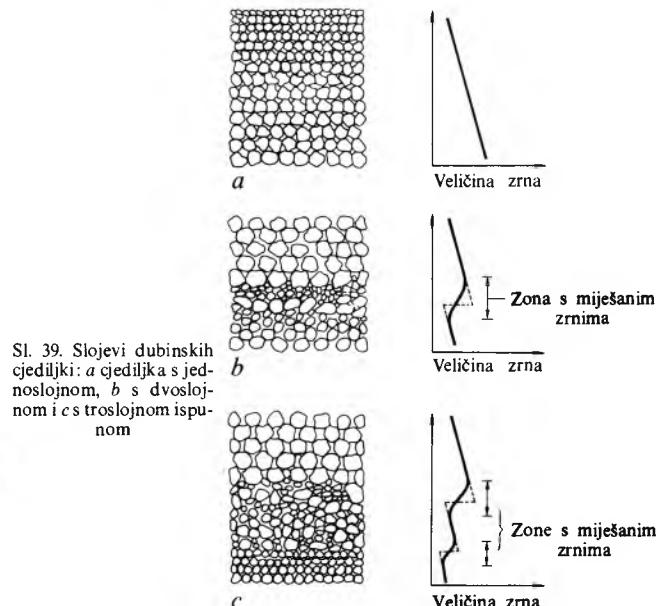
Sl. 36. Schemi dubinskih cijediljki: a dovod vode odozgo, b dovod vode odozdo, c dovod vode odozgo i odozdo



Sl. 37. Gravitacijska dubinska cijediljka

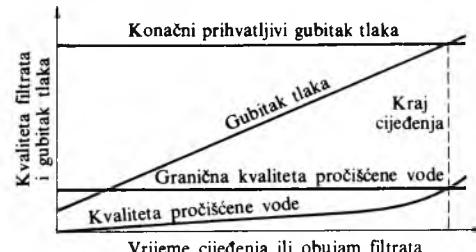


S obzirom na protok kroz cijediljku razlikuju se cijediljke s konstantnim protokom kroz ispunu i cijediljke s promjenljivim protokom koji ovisi o začepljenju ispune. Zadržavanjem taloga na cijediljki smanjuje se učinak cijeđenja, te se na kraju projedivanja sadržaj muteži približava dopuštenoj granici (sl. 40). Istodobno sa smanjenjem učinka, zbog zatvaranja pora, povećava se hidraulički otpor cijediljke. U trenutku kad se otpor cijediljke približi raspoloživom tlaku, prestaje cijeđenje, pa se mora cijediljka oprati. Pere se vodom ili smjesom vode i zraka. Cijeđenjem otpadne vode može se smanjiti ukupni fosfor za 70...98%, KPK za 20...45%, BPK za 40...70% i mutež za 60...95%. Učinak procjeđivanja, izbor materijala za ispunu i dimenzioniranje cijediljke određuje se ispitivanjem na modelima.



Sl. 39. Slojevi dubinskih cijediljki: a cijediljka s jednoslojnom, b s dvoslojnom i c s trošlojnom ispunom

Najčešće visina sloja jednoslojnih ispuna iznosi 0,9...2,0 m, a veličina zrnaca 2...3 mm. U dvoslojnoj cijediljci s ispunom od pjeska i antracita veličine zrna pjeska iznose 0,4...0,8 mm, a visina pješčanog sloja 1,5...3,0 m, dok je veličina zrna antracita 0,8...2,0 mm, a visina sloja 3,0...6,0 m. Hidrauličko je opterećenje po m^2 površine 1,3...6,7 L/s.



Sl. 40. Prikaz učinka cijedjenja prema njegovu trajanju

Centrifugiranje je postupak odvajanja krutina od tekućine i tekućina različite gustoće djelovanjem centrifugalnih sila (v. *Centrifugiranje*, TE 2, str. 590). Najčešće se primjenjuje za odstranjivanje vode iz mulja. Prednost je centrifugiranja prema cijeđenju u tome što nema opasnosti od začepljenja i što je potreban manji prostor za smještaj uređaja. Prije centrifugiranja potrebno je zgrušavanje dodatkom polielektrolyta. Centrifugiranjem se postiže koncentracija suhe tvari u preostalom kolaču od 15...25% kad je mulj organskog porijekla, odnosno 20...60% kad je mulj anorganskog porijekla. Potrošnja energije po toni suhe tvari iznosi 30...60 kWh.

Adsorpcija je gomilanje tvari na granici između dviju faza. U tehniči čišćenja otpadne vode iskorištava se sposobnost nekih tvari da privuku na svoju površinu ione ili molekule koje se nalaze raspršene u plinu ili tekućini (v. *Adsorpcija*, TE 1, str. 1). Čvrsta tvar koja adsorbira naziva se adsorbentom, a tvar koju adsorbira adsorptivom. Adsorpcijom se uklanjuju organski nerazgradljivi spojevi, mirisi i boje. Na adsorpciju utječe van der Waalsove elektrostatičke sile koje ne ovise o kemijskom sastavu adsorbenta i koje su općenito reverzibilne. Kemijska adsorpcija nastaje kad međusobno reagiraju molekule na površini adsorbenta i adsorptiva. Pri tom nastaje kemijski spoj, pa je taj proces općenito irreverzibilan.

Za čišćenje otpadnih voda upotrebljavaju se adsorbenti koji imaju nepovratnu adsorpciju, odnosno kojima se desorpcija može kontrolirati. Kao adsorbenti upotrebljavaju se fina ilovača, silicij, aktivna glina i aktivni ugljen. Učinak adsorpcije ovisi o površini zrnaca prema masi adsorbenta. Prirodni adsorbenti (ilovača, glina) imaju površinu 50...200 m^2/g , pa im je

kapacitet adsorpcije malen. Industrijski proizvedeni adsorbenti imaju površinu $300\cdots1500 \text{ m}^2/\text{g}$ (aktivni ugljen), te je njihov kapacitet adsorpcije velik. Aktivni ugljen upotrebljava se u prahu ili zrnima.

Učinak adsorpcije vrlo je velik (i do 99%), te predstavlja završno čišćenje otpadnih voda, a osobito za uklanjanje fenola, detergenata, fosfata, nitrata, klorova (u postupku dekloriranja), KPK, boje i mirisa.

Tipično hidrauličko opterećenje cijediljke s aktivnim ugljenom iznosi po četvornom metru $1,4\cdots6,8 \text{ L/s}$.

Nakon zasićenja zrnca se aktivnog ugljena regeneriraju topilinskim ili fizično-kemijskim postupcima.

Ionska izmjena postupak je zamjene iona između krutine (ionskog izmjenjivača) i tekućine (otopine elektrolita). Ionski izmjenjivači imaju kostur na kojem su fiksirani nepokretni ioni s pozitivnim ili negativnim nabojem. Pokretni ioni su protong naboja koji se nalaze u izmjenjivaču mogu se zamjeniti ionima istog naboja iz otopine elektrolita (v. *Ionska izmjena*, TE 6, str. 576). Kationski ionski izmjenjivači imaju kiseli karakter pa fiksiraju neorganske i organske katione i zamjenjuju ih s ionom vodika H^+ . Anionski imaju bazična svojstva, pa organske i anorganske anione zamjenjuju s hidroksilnim ionom OH^- . Materijal ionskih izmjenjivača mora biti neotopljiv u normalnim radnim uvjetima, a veličina zrnaca podjednaka. Za čišćenje vode ionski izmjenjivači se upotrebljavaju kao zatvorene dubinske cijediljke.

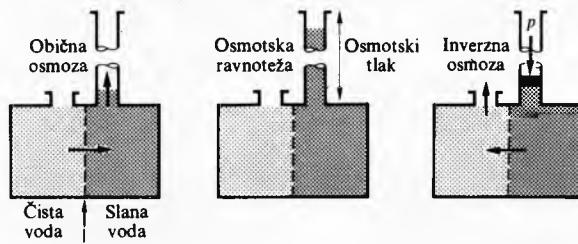
Cijediljkama s ionskim izmjenjivačima ne mogu se istodobno ukloniti koloidi i suspenzije. Mješavina ulja i otopljenih plinova smanjuje učinak ionskih izmjenjivača i njihovo trajanje.

Ionska izmjena najčešće se primjenjuje za čišćenje otpadnih industrijskih voda koje sadrže metale, fosfate i dušik, te za pripremu vode (omekšavanje, dekarbonizacija, demineralizacija).

Membranski postupci jesu metode čišćenja vode polupropusnim membranama koje propuštaju vodu i neke otopljene tvari, ali su nepropusne za tvari koje treba ukloniti iz vode.

Za čišćenje otpadne vode primjenjuje se inverzna osmoza, elektrodijaliza i ultrafiltracija. Inverznom osmozom i elektrodijalizom mogu se iz vode uklanjati nepoželjni ioni i ultrafiltracijom veći organski ioni, makromolekule i mikročestice. Membranski postupci prikladni su za čišćenje industrijskih otpadnih voda, osobito ako se uklonjeni onečišćivači vode mogu ponovno iskoristiti (sekundarne sirovine) te tako sniziti troškovi čišćenja vode. Pokušalo se da se nakon biološkog i fizično-kemijskog čišćenja otpadnih voda primijene membranski postupci, što bi omogućilo ponovnu upotrebu vode za vodoopskrbu.

Inverzna osmoza je postupak koji se temelji na osmozi. U zatvorenim posudama u kojima su dvije otopine različite koncentracije, a koje su odvojene polupropusnom membranom, voda će prolaziti iz posude s otopinom manje koncentracije u posudu gdje se nalazi otopina veće koncentracije (sl. 41) sve dok se ne izjednače koncentracije s obje strane membrane.

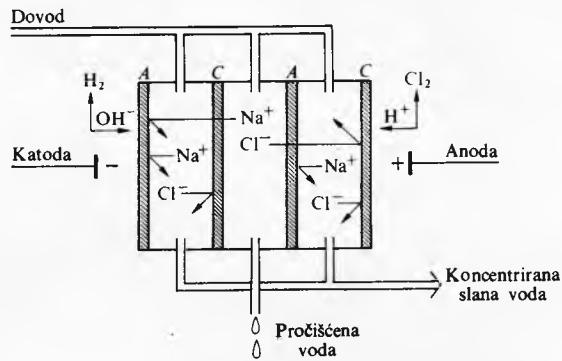


Sl. 41. Shematski prikaz inverzne osmoze

Idealna membrana omogućuje prolaz molekulama vode, a sprečava prolaz ionima otopljene tvari. Razlika tlakova u obje posude nakon izjednačenja koncentracija naziva se osmotskim tlakom. Poveća li se tlak u posudi s većom koncentracijom iznad osmotskog tlaka, voda će prolaziti u obrnutom smjeru kroz polupropusnu membranu. Pri tom će se povećati koncentracija otpadne tvari u posudi s većom koncentracijom, dok će u drugu posudu dotjecati čista voda. Zbog obrnutog toka vode postupak je nazvan inverznom osmozom. Osnovni je

problem primjene toga postupka mogućnost proizvodnje membrane prihvatljivih u gospodarskom i tehničkom pogledu.

Elektrodijalizom uklanjuju se iz vode ioni koji prolaze kroz polupropusne membrane djelovanjem električnog polja (v. *Elektrodijaliza*, TE 4, str. 337). Polupropusne membrane su selektivne, pa jedne propuštaju katione, a druge anione, dok u međuprostoru ostaje očišćena voda (sl. 42). Učinak ovisi o kvaliteti membrane i prethodnom bistrenju vode.



Sl. 42. Shematski prikaz elektrodijalize

Ultrafiltracija je postupak propuštanja otpadne vode kroz membrane koje propuštaju vodu, a zadržavaju makromolekule veće od pora membrane. S vodom prolaze i otopljene tvari kojima su molekule manje od pora. Primjenjuje se u prehrabbenoj industriji za bistrenje vina i voćnih sokova, za odvajanje proteina, šećera i enzima. Moguće je ultrafiltracijom pročišćivati upotrijebljena mineralna ulja da bi se ponovno upotrijebila.

Kemijsko obaranje (kemijska precipitacija) postupak je kojim se uklanjuju nepoželjne otopljene tvari iz otpadne vode dodavanjem kemijskih sredstava (reagensa). Rastvaranjem reagensa u vodi ioni dodatnih sredstava kombiniraju se s nepoželjnim ionima u vodi, pa nastaju nove netopljive soli koje se talože na dno spremnika. Tim je postupkom moguće iz vode ukloniti soli kalcija, magnezija i silicija, te fluoride i fosfate. Primjenjuje se za uklanjanje iz vode metalnih iona (kadmija, bakra, kroma, nikla, cinka, olova, željeza i srebra).

Pod kemijskim obaranjem (precipitacijom) neki autori (uglavnom američki) razumijevaju uklanjanje raspršenih krutih tvari (koloida) i otopljenih soli, što odgovara istodobnom zgrušavanju, pahuljčenju i obaranju. U evropskoj praksi uobičajeno je da se obaranjem naziva izdvajanje iz vode otopljenih tvari.

Budući da se za obaranje upotrebljavaju reagensi kao i za zgrušavanje, u otpadnoj vodi u kojoj se nalaze otpadne tvari u raspršenom i u otopljenom obliku odvija se istodobno zgrušavanje i obaranje.

Neutralizacija je postupak za korekciju koncentracije vodikovih iona (vrijednosti pH) u otpadnim vodama. Industrijske otpadne vode često sadrže kisele ili bazične sastojke koji mijenjaju svojstva vode. U prirodne vodne sustave smiju se ispuštati otpadne vode s vrijednosti pH u granicama od $6\cdots9$, a kad se primjeni biološko čišćenje, potrebno je pH održavati u granicama od $6,5\cdots8$. Ako vrijednosti pH otpadnih voda nisu u navedenim granicama, moraju se popravljati, što se postiže neutralizacijom.

Najjednostavnije se postiže neutralizacija miješanjem otpadnih voda iz različitih pogona, odnosno miješanjem kiselih s bazičnim otpadnim vodama. Druga je mogućnost dodavanje reagensa, npr. natrijeve lužine (NaOH) u kisele vode, a sumporne kiseline (H_2SO_4) u bazične vode.

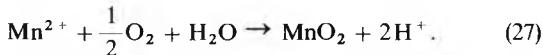
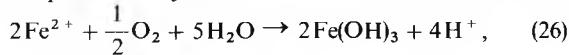
Postupak neutralizacije otpadnih voda jedan je od temeljnih postupaka za prethodno čišćenje industrijskih otpadnih voda. U spremnicima za neutralizaciju miješaju se otpadne vode radi ubrzanja procesa. Potrebna je automatska kontrola vrijednosti pH . Izbor sredstava i količina za neutralizaciju utvrđuju se ispitivanjem voda.

Oksidacija i redukcija najčešće se definiraju kao reakcije u kojima se prihvataju ili gube elektroni. Atom male ionicijske energije lako predaje elektron (elektron-donor) i tako

OTPADNE VODE

postaje pozitivno nabijeni ion (kation). Atom velikog elektronskog afiniteta lako prima elektron (elektron-akceptor) i time postaje negativno nabijeni ion (anion) (v. *Kemija, Tipovi kemijske veze*, TE 7, str. 14). Ukupna reakcija naziva se redoksi-reakcijom. Redoks-procesi vrlo su česti u vodnim sustavima, jer mnoge organske i anorganske reakcije sadrže i procese oksidacije i redukcije.

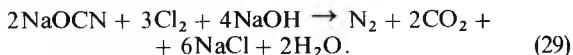
Za čišćenje otpadnih voda upotrebljava se oksidacija za dezinfekciju vode, zatim za smanjenje BPK, boje i mirisa, za uklanjanje željeza i mangana, te za pretvorbu cijanida u manje opasne spojeve. Željezni i manganski ioni uklanjuju se iz vode oksidacijom do netopljivog željezo-hidroksida ili mangano-ksoxa prema relacijama



Oksidacija zrakom traje 10–20 min uz $\text{pH} = 7$. Cijanidi se oksidiraju klorom do manje opasnih cijanata uz vrijednosti pH između 9 i 11 prema relaciji

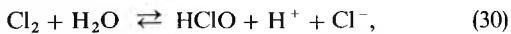


Dalje se cijanati mogu oksidirati dodatnim klorom do ugljikodioksida (CO_2) i dušika (N_2) prema relaciji



Dezinfekcija je postupak kojim se smanjuje broj patogenih mikroorganizama. Dezinfekcija se razlikuje od sterilizacije jer se sterilizacijom uništavaju svi mikroorganizmi. U čišćenju otpadnih voda primjenjuje se dezinfekcija vode i mulja. Dezinficirati se može pomoću kemijskih sredstava, fizikalnim i mehaničkim postupcima, te zračenjem.

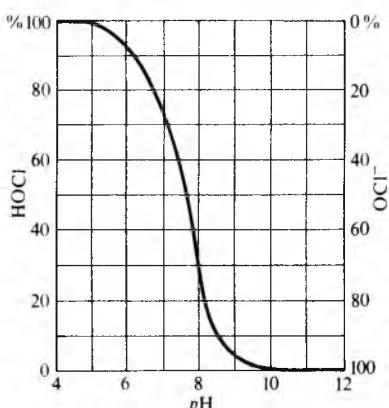
Kao dezinfekcijska sredstva primjenjuju se klor, spojevi klor-a i ozon. Baktericidno svojstvo klor-a osniva se na razaranju enzima koji pretvaraju škrob u šećer (dijastaza) i koji su prijevo potrebni za život organizma. Plinoviti klor u vodi reagira prema relaciji



pa nastaje hipokloritna kiselina (HClO) koja slabo disocira uz nastajanje hipoklorit-iona (ClO^-) prema reakciji



Međusobni omjer hipokloritne kiseline i hipoklorit-iona ovisi o vrijednosti pH (sl. 43). Učinak dezinfekcije hipokloritnom kiselinom mnogo je veći nego hipoklorit-ionom. Količina klor-a koja se dodaje za dezinfekciju ovisi o količini tvari u vodi koje se lako oksidiraju (npr. željezo(II)-ioni, nitriti). Klor koji preostaje u vodi nakon oksidacije organskih i anorganskih tvari služi kao pokazatelj klorne doze (sl. 44).



Sl. 43. Ovisnost omjera hipokloritne kiseline i hipoklorit-iona o vrijednosti pH

Klor je pogodan kao dezinfekcijsko sredstvo zbog učinka koji postiže u relativno kratkom vremenu i uz prihvatljive troškove. Međutim, klor može uzrokovati neugodan miris vode, a mogu nastati organoklorini spojevi koji su otrovni za ribe i koji su potencijalna opasnost za čovjeka.

Uobičajene doze klor-a za dezinfekciju komunalnih otpadnih voda iznose 5–20 mg/L. Smanjenje opasnosti od kloriranja vode moguće je postići višim stupnjem čišćenja, odnosno smanjenjem organskih spojeva u vodi prije dezinfekcije (adsorpcija aktivnim ugljenom).



Sl. 44. Tipična krivulja s kritičnom točkom pri kloriranju otpadnih voda

Dezinfekcija ozonom manje se primjenjuje za čišćenje otpadnih voda zbog visokih pogonskih troškova. Ozon je nestabilan plin koji nastaje od kisika u jakom električnom polju. Ozon se brzo raspada i prelazi u kisik *in statu nascendi*, koji je jak oksidant te nepovoljno djeluje na protoplazmu mikroorganizama. Potrošnja energije iznosi 10–20 kWh za kg ozona. Ozon se, osim za dezinfekciju, može upotrijebiti i za oksidaciju teško razgradljivih spojeva u otpadnim vodama.

Biološki postupci

Biološki postupci služe za pretvorbu raspršene i otopljene organske tvari u stanično tkivo (biomasu), plinove i nerazgradljivi ostatak. Mikroorganizmi razgrađuju mrtvu organsku tvar upotrebljavajući je kao hranu za gradnju vlastitih stanica, a stanična se masa taloženjem odvaja od vode.

Prema prilikama u staništu i prema količini otopljenog kisika u vodi mogući su sljedeći procesi: a) aerobna gradnja i razgradnja stanica, b) anaerobno kiselo vrenje i metanska razgradnja i c) bakteriološka oksidacija i redukcija.

Kad u otpadnoj vodi postoji dovoljna količina otopljenog kisika, odnosno kad postoje aerobni uvjeti, tada mikroorganizmi upotrebljavaju organsku tvar kao hranu za gradnju novih stanica. Kisik se troši za energetske procese. Istodobno mikroorganizmi razgrađuju vlastite stanice (respiracija) uz ponovnu potrošnju kisika. Aerobnim procesima proizvodi se višak žive i mrtve organske i anorganske tvari koja se naziva *viškom mulja*.

Aerobna razgradnja nastaje kad u vodi nema otopljenog kisika. Anaerobni proces odvija se u dvije faze. U prvoj, kiseloj ili tekućoj fazi mikroorganizmi (bakterije kiselog vrenja) razgrađuju organsku tvar do organskih kiselina koje su hrana za metanske bakterije u drugoj fazi razgradnje, metanskoj ili plinovitoj fazi. Tijekom anaerobne razgradnje organske tvari nastaje mnogo manje novih stanica nego tijekom aerobne razgradnje.

Procesi oksidacije i redukcije pomoću mikroorganizama omogućuju oksidaciju željeza i mangana, oksidaciju sumpornih spojeva, te oksidaciju i redukciju dušikovih spojeva.

Spomenuti aerobni i anaerobni procesi odnose se na razgradnju organskih spojeva u vodi. Razgradnja dušikovih spojeva odvija se bakteriološkom oksidacijom (nitrifikacijom), pa se od organskih spojeva dušika i amonijaka dobivaju nitriti koji prelaze u nitrate. Kad se u vodi u kojoj je izvršena nitrifikacija dovoljno smanji količina otopljenog kisika, počinje redukcija nitrata u nitrite, odnosno denitrifikacija. Tijekom denitrifikacije

anaerobni heterotrofi osiguravaju potrebnu energiju redukcijom nitrata u nitrite te nastaju dušikovi oksidi i dušik. Da bi se osigurala dovoljna količina energije za denitrifikaciju, potrebno je da se u vodi nalaze manje količine organskog ugljika.

Biološki postupci osjetljivi su na sastav vode koja se čisti te na prilike u staništu, a pogotovo na količinu hranjivih tvari, otopljeni kisik, temperaturu, koncentraciju vodikovih iona i otrovnih tvari.

U otpadnoj vodi razvoj mikroorganizama proporcionalan je koncentraciji hranjive tvari. Umnožavanje mikroorganizama odvija se prema reakciji prvog reda

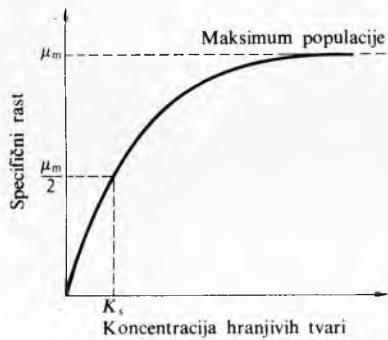
$$\frac{dx}{dt} = kx, \quad (32)$$

gdje je x masa suhih stanica u jedinici obujma, k specifični rast u jedinici vremena, a t vrijeme.

Utjecaj hranjivih tvari, odnosno ograničenje rasta mikroorganizama može se izraziti Monodovom jednadžbom (sl. 45)

$$K = K_m \frac{S}{K_s + S}, \quad (33)$$

gdje je S koncentracija hrane u vodi (masa hrane u jedinici obujma), K_m maksimalni specifični rast u jedinici vremena, a K_s koncentracija hrane na polovici maksimalnoga specifičnog rasta. Uz male koncentracije organske tvari u vodi postoji velika mogućnost razgradnje, dok je djelatnost mikroorganizama ograničena kad je vrlo velika koncentracija organske tvari u vodi.



Sl. 45. Ovisnost rasta mikroorganizama o koncentraciji hranjive tvari

Na temelju empirijskih istraživanja utvrđeni su pokazatelji za dimenzioniranje uređaja za biološke aerobne procese. *Opterećenje muljem* omjer je između mase hranjivih tvari i mase mikroorganizama u spremniku uređaja. Taj se omjer dobiva iz izraza

$$\frac{F}{M} = \frac{S_0}{\vartheta x}, \quad (34)$$

gdje je F/M dnevno opterećenje muljem, S_0 koncentracija otpadne vode u dotoku izražena pomoću BPK ili KPK (g/m^3), ϑ trajanje zadržavanja u spremniku u danima, a x koncentracija suhe organske tvari u spremniku (g/m^3).

U aerobnim procesima mikroorganizmi upotrebljavaju otopljeni kisik u vodi za razgradnju organske tvari, te za gradnju i razgradnju stanica. Dnevna količina kisika potrebna za gradnju i razgradnju stanica iznosi po jedinici obujma spremnika

$$O = a \frac{S_0 - S}{\vartheta} + bx, \quad (35)$$

gdje je a koeficijent ovisan o organskom opterećenju, b koeficijent za razgradnju stanica, S koncentracija otpadne vode na izlazu iz spremnika (g/m^3), dok ϑ i x odgovaraju oznakama u izrazu (34). Kad se kisik troši za nitrifikaciju dušikovih spojeva, potrebno je dodati količinu kisika proporcionalnu masi nitrata u spremniku.

Procesi biološkog čišćenja ovise o temperaturi kao i svaki biokemijski procesi. Povećanjem temperature oni se ubrzavaju. Malo opterećeni spremnici za postupak s aktivnim muljem praktički su neosjetljivi na promjene temperature. Prokapnici, a osobito lagune vrlo su osjetljivi na temperaturne promjene, pa su učinci čišćenja različiti u ljetnom i zimskom razdoblju. Anaerobni procesi odvijaju se sporije na nižim temperaturama, a posebno metanska razgradnja. Zbog toga se spremnici za anaerobnu razgradnju zagrijavaju na temperaturu $30\text{--}55^\circ\text{C}$. Brzina denitrifikacije bitno se smanjuje kad su temperature niže od 10°C .

Promjene koncentracije vodikovih iona (vrijednost pH) utječu na odvijanje bioloških procesa. Za većinu procesa optimalno je područje vrijednosti pH između 6,5 i 8,5. Povećanjem ili smanjenjem vrijednosti pH smanjuje se razgradnja organske tvari. Metanske su bakterije osobito osjetljive na promjene vrijednosti pH. Najpovoljnije su vrijednosti pH za nitrifikaciju između 7,2 i 9,0. Alkalitet je vode potreban zbog vodikovih iona koji se izdvajaju u procesu.

Mnoge tvari djeluju toksično na mikroorganizme. Prema svojstvima i koncentraciji otpadnih tvari mogu se usporiti reakcije, pa mogu mikroorganizmi i uginuti. Otpadne tvari koje uzrokuju poremećaje mogu se svrstati u tri grupe: *a*) organske tvari koje su otrovne u velikim koncentracijama, a biološki razgradljive kad im je koncentracija malena (fenoli), *b*) teški metali koji mogu uništiti bakterije i uz male koncentracije, *c*) anorganske soli i amonijak koji usporavaju procese kad je njihova koncentracija velika (kritična koncentracija amonijaka iznosi 1000 mg/L uz $\text{pH} = 7,0$).

Biološki postupci primjenjuju se za čišćenje kućanskih otpadnih voda i za čišćenje industrijskih otpadnih voda ako su otpadne tvari biološki razgradljive i ako ne sadrže opasne tvari u kritičnim koncentracijama. Biološki postupci služe za smanjenje organskih tvari u otpadnoj vodi i za stabilizaciju mulja organskog porijekla.

Mikroorganizmi u uređajima za biološko čišćenje voda mogu biti suspendirani u vodi ili pričvršćeni na kruta tijela u obliku biološke sluzi (tabl. 11).

Tablica 11
PREGLED GLAVNIH BIOLOŠKIH POSTUPAKA

Način održavanja mikroorganizama	Aerobni postupci	Anaerobni postupci	Bakteriološka oksidacija i redukcija
Mikroorganizmi suspendirani u vodi	Aktivni mulj Ozračena laguna Aerobna laguna Stabilizacija mulja	Anaerobna digestija vode Anaerobna laguna Anaerobna stabilizacija mulja	Nitrifikacija Denitrifikacija
Mikroorganizmi pričvršćeni na podlozi	Prokapnici Okretni bio-loški nosači (biodiskovi) Grube pješčane cijediljke	Anaerobne cijediljke Anaerobna laguna	Nitrifikacija Denitrifikacija

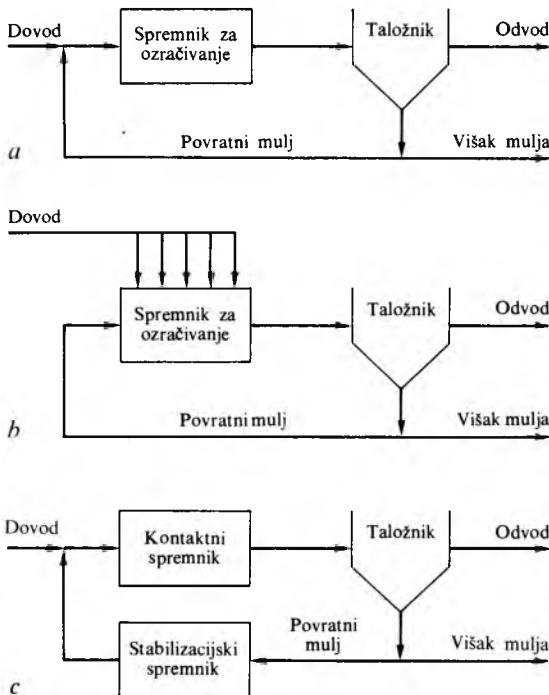
Aktivni mulj je masa mikroorganizama raspršenih u spremniku koji u aerobnim prilikama mogu razgraditi organsku tvar.

Otpadna voda uvodi se u spremnik u koji se dodaje zrak ili kisik uz istodobno miješanje sadržine spremnika, čime se ubrzava dodir pahuljica hranjive tvari i mikroorganizama. Otpadna voda s mješavinom otpadne tvari i mikroorganizama bistri se u naknadnom taložniku. Dio istaloženih pahuljica (aktivni mulj) vraća se u spremnik za ozračivanje kako bi se povećala koncentracija mikroorganizama, a ostatak (višak mulja) odvodi se na obradbu mulja (sl. 46).

Učinak ovisi o opterećenju muljem. Pri čišćenju komunalnih otpadnih voda sa sadržajem organskih tvari BPK od $150\text{--}350 \text{ mg/L}$ mogu se postići učinci navedeni u tabl. 12. Manje

OTPADNE VODE

vrijednosti vrijede za zimsko razdoblje ($T < 11^{\circ}\text{C}$), a veće za ljetno razdoblje ($T > 13^{\circ}\text{C}$). Zrak ili kisik unosi se mjeđuhrićima zraka ili kisika kroz uronjene raspršivače u spremnik za ozračivanje ili raspršivanjem otpadne vode da bi se povećale dodirne površine vode i zraka.

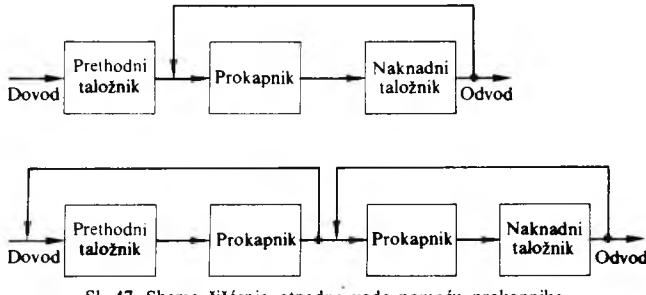


Sl. 46. Tipične sheme uređaja za postupak s aktivnim muljem:
a) konvencionalni uređaj, b) uređaj s postupnim ozračivanjem,
c) uređaj s kontaktom stabilizacijom

Tablica 12
SREDNJE VRIJEDNOSTI SMANJENJA ORGANSKE
TVARI POSTUPKOM AKTIVNOG MULJA

Omjer mase hranjivih tvari i mikroorganizama	Smanjenje organskih tvari, %
0,05	95
0,10	93
0,50	90
1,00	82...87
2,00	75...82

Prokapnik (biološki filter) je spremnik ispunjen čvrstim tijelima (kamen, troska, plastični komadi) na kojima je opna (film) od mikroorganizama. Voda prokapljuje kroz ispunu (sl. 47).



Sl. 47. Sheme čišćenja otpadne vode pomoću prokapnika

Razgradnjom organske tvari povećava se broj mikroorganizama, odnosno biološka opna, prioljivost za ispunu se smanjuje i opna se otkida pa je odnosi pročišćena voda. Taj gubitak biološke opne naziva se ispiranjem prokapnika. Za učinak rada prokapnika mjerodavno je organsko opterećenje (dnevna masa organske tvari na jedinicu volumena prokapnika) i hidrauličko

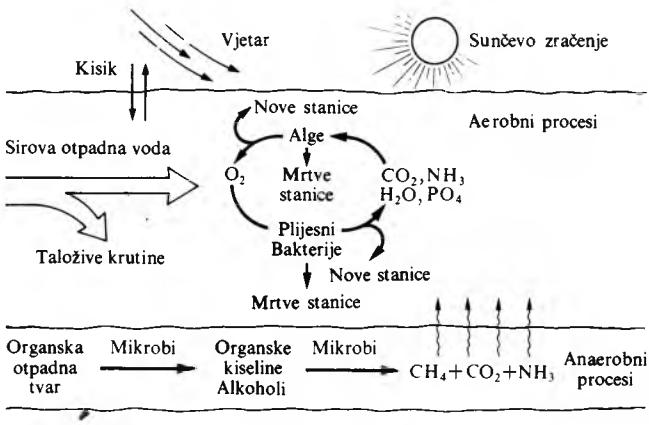
opterećenje (dnevni protok otpadne vode kroz jedinicu površine prokapnika). Učinak prokapnika vidi se u tabl. 13.

Tablica 13
SREDNJE VRIJEDNOSTI SMANJENJA ORGANSKE TVARI
POSTUPKOM PROKAPNIKA

Opterećenost	Dnevno opterećenje		Smanjenje BPK-5 %
	hidrauličko m^3/m^2	organsko kg/m^3	
niska	1...10	0,08...0,48	75...85
visoka	10...40	0,48...1,0	75...85
vrlo visoka	40...200	0,8...6,0	70...90

Biodisk je uređaj s okruglim pločama (diskovima) nanizanim na vodoravnu osovinu i uronjenim do polovice promjera u spremnik s otpadnom vodom. Opna od mikroorganizama nalazi se na površini ploča. Ozračuje se laganim okretanjem osovine tako da je uvijek polovica ploče u vodi. Učinak čišćenja ovisi o organskom opterećenju površine ploča, pa učinak čišćenja kućanskih otpadnih voda doseže i do 94%. Budući da su mikroorganizmi na pločama polovicu vremena ozračeni, postupak s biodiskom prikladan je i za industrijske biološki razgradljive otpadne vode s visokom koncentracijom organske tvari.

Lagune su plitki, prostrani, zemljani spremnici u kojima se razgrađuju organske tvari. Čišćenje u lagunama vrlo je blisko postupku samoočišćenja vode u prirodnim vodnim sustavima. Uz biološke procese u lagunama se istodobno odvija i taloženje i isplivavanje. Prema organskom opterećenju, dubini vode u laguni i klimatskim prilikama razgradnja se organske tvari odvija aerobnim ili anaerobnim procesima uz fotosintezu algi (sl. 48).



Sl. 48. Biološki procesi u laguni

Lagune mogu biti aerobne, anaerobne, fakultativne (aerobno-anaerobne) i ozračene (tabl. 14). Dio mikroorganizama u lagunama raspršen je u tekućini, a dio se nalazi na dnu. Za vode iz ozračene lagune, zbog veće mase pahuljica, potrebno je predvidjeti naknadno taloženje. Neozračene lagune obično ne imaju naknadni taložnik.

Tablica 14
KARAKTERISTIKE TIPOVA LAGUNA

Tip lagune	Srednja dubina m	Vrijeme zadržavanja dana	Dnevno organsko opterećenje BPK-5 kg/ha
Anaerobna	2,5...5	20...50	200...500
Fakultativna	1,0...2,5	7...30	50...200
Aerobna	0,5...1,5	10...40	40...120
Ozračena	2,0...6,0	3...10	do 500

Zbog niskih investicijskih i pogonskih troškova lagune su prikladne za mala naselja, ali se mogu upotrijebiti i za industrijske otpadne vode koje su biološki razgradljive.

Učinak je laguna promjenljiv jer ovisi o vremenskim prilikama tijekom godine. U ljetnom razdoblju može se postići smanjenje organske tvari u kućanskim otpadnim vodama za 80...95%.

Aerobna stabilizacija je postupak obrade mulja kojim se smanjuje sadržaj organske tvari da bi se spriječilo dalje truljenje. Taj proces omogućuju aerobni mikroorganizmi rasprešeni u spremniku kojima se dodaje zrak ili kisik uz miješanje sadržaja spremnika.

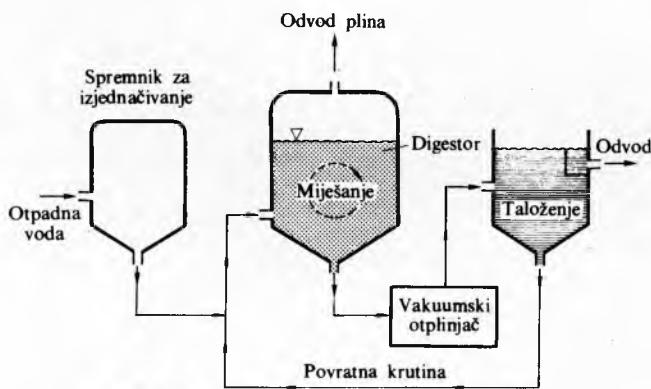
Ispitujte se postupci s grijanjem mulja kako bi se smanjilo trajanje digestije.

Učinak razgradnje organske tvari na temperaturi od 20 °C u digestoru, uz zadržavanje od 10...12 dana, najčešće iznosi 35...45%.

Anaerobna digestija često se primjenjuje za stabilizaciju mulja, ali i za čišćenje otpadnih voda s visokim organskim opterećenjem (s više od 2,0 kg BPK-5 po m³). Zbog toga je pogodna za čišćenje otpadnih voda prehrambene industrije.

Anaerobna razgradnja organske tvari odvija se u zatvorenim spremnicima (bez pristupa zraka) uz istodobno kiselo i metansko vrenje. Povišenjem temperature i miješanjem sadržaja spremnika moguće je ubrzati biološke procese. Konačni je proizvod metanskog vrenja metan koji se može neposredno upotrijebiti kao gorivo.

Slično kao u postupku aktivnog mulja, mulj dobiven anaerobnom digestijom vraća se u proces (anaerobni kontaktni postupak, sl. 49).



Sl. 49. Shema anaerobnog kontaktog postupka

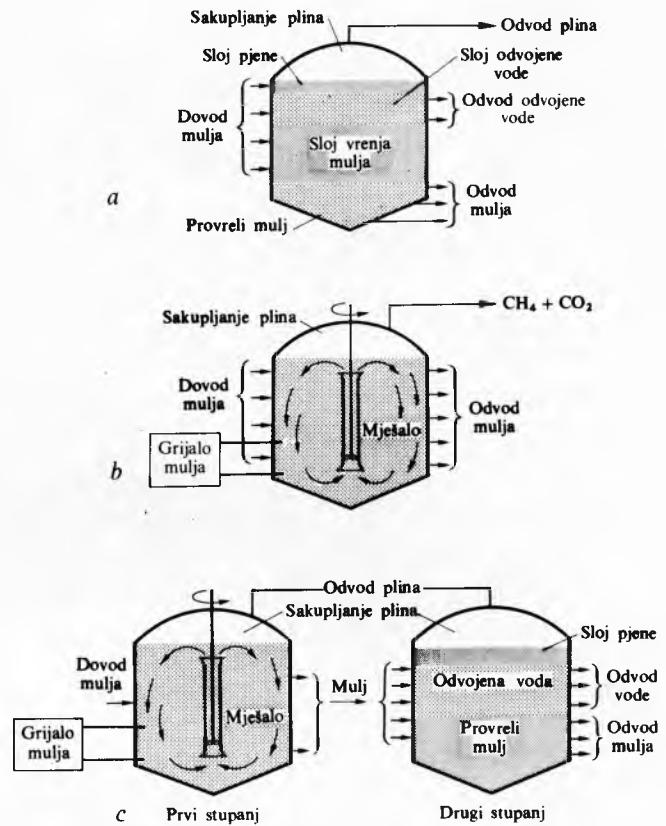
Nakon anaerobne digestije otpadne vode obično slijedi aerobno čišćenje prije ispuštanja u prirodne prijamnike. Za anaerobnu digestiju vode i mulja upotrebljavaju se dva tipa digestora: konvencionalni (jedan spremnik bez grijanja i miješanja) i visoko opterećeni (jedan ili dva spremnika od kojih se prvi grijije i u kojem se voda miješa, sl. 50). Grijanjem u visoko opterećenom digestoru proces se ubrzava, pa je zadržavanje vode u spremniku kraće (tabl. 15).

Tablica 15

SREDNJE VRIJEDNOSTI OPTEREĆENJA KONVENCIJALNOG I VISOKOOPTEREĆENOG DIGESTORA

Digestor	Vrijeme zadržavanja dana	Dnevno opterećenje organskom tvari kg/m ³
Konvencionalni	30...90	0,50...1,6
Visokoopterećeni	1...20	1,6...6,4

Učinak razgradnje organske tvari anaerobnom digestijom iznosi 55...58%. Proizvodnja plina najčešće iznosi 0,75...1,12 m³/kg razgrađene organske tvari. Plin sadrži 65...70% metana, pa je donja ogrjevna moć digestorskog plina ~22 MJ/m³.



Sl. 50. Tipovi digestora: a) postupak bez miješanja, b) intenzivni postupak s miješanjem, c) postupak sa dva stupnja

Stabilizacija mulja anaerobnom digestijom povoljna je u većim uređajima zbog nižih investicijskih i pogonskih troškova. Najveći digestori imaju obujam spremnika od 12000 m³.

Toplinski postupci

Toplinski postupci primjenjuju se za čišćenje otpadnih voda i preradbu mulja, i to za smanjenje obujma i povećanje koncentracije otpadne tvari u vodi ili mulju.

Isparivanje je postupak odvajanja vode u obliku pare grijanjem otpadne vode (v. *Isparivanje*, TE 6, str. 540). Isparivanjem se povećava koncentracija krutina u otpadnoj vodi do vrijednosti povoljne za ponovnu upotrebu ili za kontrolirano ispuštanje.

Zbog visokih pogonskih troškova taj se postupak primjenjuje za čišćenje industrijskih otpadnih voda kad je gospodarski opravданo ponovno iskorištavati otpadne tvari kao sekundarne sirovine.

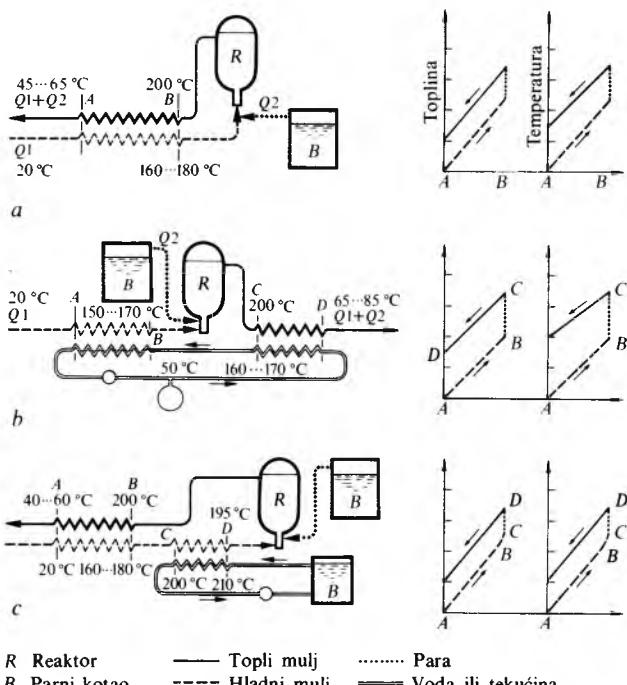
Toplinska obrada mulja je postupak za smanjenje viška vode u mulju, stabilizaciju i dezinfekciju mulja.

Postupak dezinfekcije mulja poznat je kao *pasterizacija*. Tekući mulj zagrijava se do 70 °C i održava na toj temperaturi 20 minuta. Pasterizirati se može svježi i stabilizirani mulj. U pasteriziranom mulju obično se ne opažaju preživjele bakterije i virusi, ali su u nekim slučajevima opaženi paraziti.

Toplinskim kondicioniranjem (sl. 51) poboljšavaju se uvjeti za cijeđenje mulja. Primjenjuje se za sve vrste biološkog mulja, pa i za one koje se teško zgrušavaju dodatkom kemijskih reagensa. Mulj se zagrijava do temperature od 160...210 °C u trajanju od 30...60 min. Toplinski kondicionirani mulj praktički je sterilan, bez neugodnog mirisa.

Mulj se *toplinski stabilizira* na temperaturi od 260 °C pod tlakom do 2,75 MPa. Zbog povišenog tlaka i temperature raspadaju se stanice mikroorganizama. To je istodobno kondicioniranje i dezinfekcija mulja. Povišenjem temperature otpušta se vezana voda te se čvrsta tvar zgrušava.

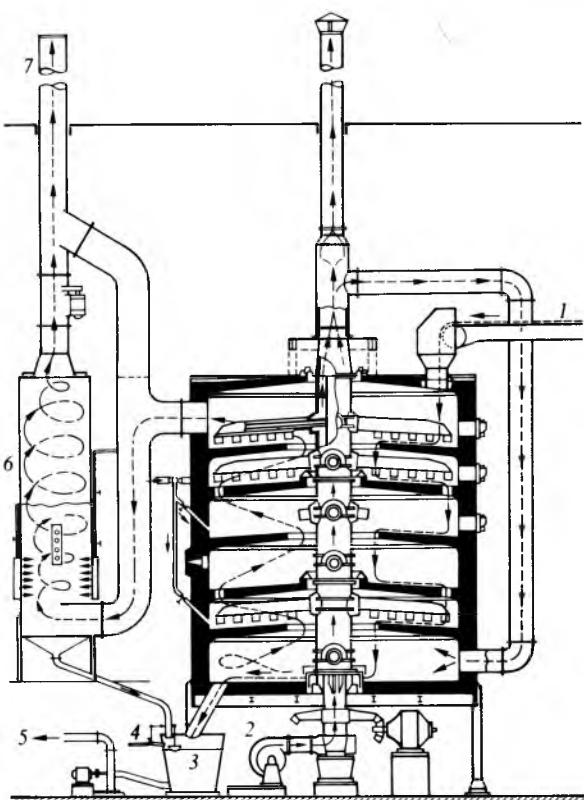
OTPADNE VODE



Sl. 51. Sheme toplinskog kondicioniranja mulja: a proces mulj–mulj, b proces mulj–voda, c proces mulj–mulj i mulj–neisparljiva tekućina

Za postupke toplinske obradbe mulja karakteristična je veća potrošnja energije, pa i veći pogonski troškovi. Pojavljuju se i problemi uklanjanja neugodna mirisa isparene vode i povećanje organskog opterećenja povratne vode nakon cijedenja.

Toplinsko smanjenje obujma mulja potpuna je ili djelomična pretvorba organskih tvari u anorganske, ugljik-dioksid i vodu. Toplinsko smanjenje obujma mulja posljednji je postupak obrad-



Sl. 52. Višekatna peć za spaljivanje mulja. 1 dovod mulja, 2 zrak za hlađenje, 3 pepeo, 4 dodatna voda, 5 odvod u lagunu, 6 ispiranje u ciklonu, 7 odvod plinova izgaranja

be mulja prije konačnog ispuštanja. Zbog visokih investicijskih i pogonskih troškova primjenjuje se samo kad se radi o velikim količinama mulja. S obzirom na sličnost postupka i svojstva otpadne tvari moguća je i istodobna obradba mulja iz komunalnih uređaja i krutog gradskog otpada (smeća).

Sušenje, spaljivanje i piroliza najčešći su postupci za toplinsko smanjenje obujma mulja.

Sušenje se provodi na temperaturi $200\text{--}400^{\circ}\text{C}$. Konačni proizvod sadrži $\sim 90\%$ suhe tvari. Sušeni mulj može se upotrijebiti u poljoprivredi kao poboljšivač tla ako ne sadrži teške metale. Nedostatak je sušenja mulja u tome što je potrebna velika količina energije za isparivanje vode. Zbog visokih troškova za energiju sušenju mora prethoditi cijedenje da bi se smanjio sadržaj vode u mulju.

Spaljivanje je izgaranje svih organskih tvari uz isparivanje ukupne vode. Konačni je proizvod anorganska tvar, odnosno pepeo. Zbog visokih temperatura izgaranja u plinovima izgaranja nema neugodnih mirisa. Teški metali iz mulja zadržavaju se u pepelu, što treba uzeti u obzir prilikom izbora mesta za odlaganje pepela.

Sveži mulj iz uređaja za čišćenje komunalnih otpadnih voda potrebno je prije spaljivanja cijediti i sušiti (sl. 52).

Piroliza je razgradnja organskih tvari na visokim temperaturama u atmosferi bez kisika. Konačni su proizvod pirolize plinovi (metan, vodik, ugljik-monoksid), ulja, katran, pougljena kruta tvar i pepeo. Većina proizvoda pirolize može se iskoristiti kao gorivo.

ISPUŠTANJE OTPADNIH VODA I MULJA

Ispuštanje otpadnih voda posljednja je operacija upravljanja kanalizacionim sustavom. Istodobno s ispuštanjem otpadnih voda treba kontrolirati stanje vodnih sustava u koje se ispuštaju otpadne vode kako bi se sprječile sve nepoželjne promjene. Otpadne vode mogu se ispuštati u vodotoke, jezera, more ili na zemljiste. Uvjeti ispuštanja otpadnih voda ovise i o svojstvima otpadne vode i o svojstvima prijamnika. Poremećaji koji nastaju u ekološkim sustavima zbog ispuštanja otpadnih tvari dugotrajni su, a njihov utjecaj na okoliš pojavljuje se i sa zakašnjenjem od više godina. Zbog toga se uvjeti ispuštanja ne mogu odrediti prema povratnim informacijama, jer bi nakon nastalih promjena već bilo prekrasno za promjenu načina upravljanja kanalizacionim sustavom. Zbog toga se pri ispuštanju otpadnih voda moraju primijeniti određeni kriteriji, odnosno propisani standardi kojima se zaštićuju ekološki sustavi od nepoželjnih promjena.

Svi standardi za zaštitu voda mogu se svrstati u dvije grupe: standardi koji se odnose na prijamnike i standardi koji se odnose na ispuštene vode.

Standardima koji se odnose na prijamnike određena je namjena ili način iskoriščavanja prijamnika i granične vrijednosti pojedinih pokazatelja kvaliteta prijamnika. Standardima ispuštene vode određeni su dopušteni dotoci pojedinih onečišćivača, odnosno potrebeni stupanj čišćenja otpadnih voda. Primjenom standarda koji se odnose na vodotoke u povoljnijem su položaju potrošači vode koji otpadne vode ispuštaju u veću vodenu masu prijamnika. Takvi standardi dopuštaju besplatno iskoriščavanje postupaka samočišćenja vodnog sustava. Standardima koji se odnose na ispuštene otpadne vode postiže se stroža kontrola ispuštenih otpadnih tvari i energije. To traži veće troškove čišćenja iskorišćenih voda, pa se neke industrije odlučuju za primjenu zatvorenih ciklusa tehnoloških i rashladnih voda.

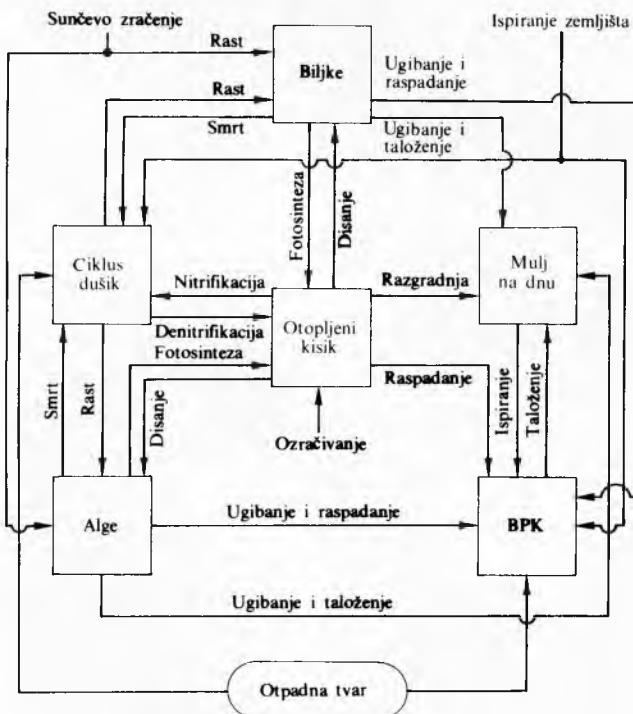
Primjenom temeljnih načela gospodarenja vodama ne mogu se dopuštaći pojedinačni međusobno neovisni ispusti na području sliva. Stupnjevi čišćenja otpadnih voda prije ispuštanja i s tim u vezi troškovi kanalizacionih sustava, kad se racionalno gospodari vodama, trebaju biti optimalni za cijeli vodni sustav, uz uvjet da se postignu najmanji mogući troškovi u cijelom slivu. Pri tom treba razmotriti i mogućnost povećanja najmanjih protoka vodotoka (gradnja akumulacija) uz sniženje troškova za čišćenje otpadnih voda, te drugih postupaka kojima se povećava sposobnost samočišćenja prijamnika. Dakako da se mora zabraniti ispuštanje opasnih tvari u okoliš.

Ispuštanje u vodotoke ubičajeno je iz kanalizacija naseljenih mesta i industrijskih pogona smještenih uz riječne obale. Rijeke tako postaju glavni sakupljači svih otpadnih i oborinskih voda, a istodobno su izvorišta vode za vodovode, ribnjake i rekreaciju. Razgradnja organske tvari mikroorganizmima u površinskim vodama naziva se *samočišćenjem voda*. Procesi mineralizacije organske tvari u vodotoku i u uređajima za čišćenje vode odvijaju se prema istim biološkim zakonima. Biološki procesi razgradnje u vodotoku razlikuju se samo po tome što se mineralizacija odvija na duljini od nekoliko kilometara, dok se u uređajima za čišćenje mineralizacija odvija na putu od nekoliko metara. Optimalni uvjeti za razvoj mikroorganizama teže se održavaju u vodotoku nego u uređajima. Procesi samočišćenja odvijaju se istodobno s ribolovom, rekreacijom, navodnjavanjem i vodoopskrbom. Zbog toga je potrebno da se ispuštanjem otpadnih tvari što manje poremeti prirodna dinamička ravnoteža.

Kisik je jedan od temeljnih činilaca za održavanje životnih zajednica (biocenozâ) vodnih sustava. O aerobnim prilikama u vodi prijamnika ovisi ograničenje ispuštanja biološki razgradljivih otpadnih tvari. Za kontrolu ispuštanja biološki razgradljivih otpadnih voda u vodotoke upotrebljavaju se matematički modeli kojima se opisuju odnosi otopljenog kisika i biokemijske potrošnje kisika. Uvijek su to pojednostavljeni modeli jer su odnosi u vodnom sustavu vrlo složeni (sl. 53). Najstariji (1925) je *Streeter-Phelpsov model* koji se uz manje ili veće popravke upotrebljava i danas. U tom modelu manjak kisika u trenutku t određuje se iz izraza

$$D_t = \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} [\exp(-K_1 t) - \exp(-K_2 t)] + D_0 \exp(-K_2 t), \quad (36)$$

gdje je K_1 dnevni učinak biokemijske reakcije, K_2 dnevni učinak ozračivanja, L_0 koncentracija BPK (g/m^3) na ispustu otpadne vode u trenutku $t = 0$, a D_0 deficit kisika (g/m^3) na ispustu otpadne vode u trenutku $t = 0$.



Sl. 53. Pojave u vodnom sustavu

Streeter-Phelpsov model dopunjavan je drugim utjecajima kao što su dnevne oscilacije fotosintetskih i respiratornih procesa, utjecaj BPK sa dna vodotoka i razgradnje organskih spojeva dušika. O'Connorov model obuhvaća te utjecaje, pa se promjena srednje koncentracije kisika C u vodi s vremenom

t opisuje izrazom

$$\frac{dC}{dt} = K_2(C_s - C_t) - K_{1C}L_{tC} - K_{1N}L_{tN} - D_B - R + P, \quad (37)$$

gdje je C_s koncentracija kisika u zasićenoj vodi (g/m^3), C_t koncentracija otopljenog kisika (g/m^3) u trenutku t , K_{1C} dnevni učinak biokemijske razgradnje ugljikovih spojeva, L_{tC} koncentracija ugljikova BPK (g/m^3) u trenutku t , K_{1N} dnevni učinak biokemijske razgradnje dušikovih spojeva, L_{tN} koncentracija dušikova BPK (g/m^3) u trenutku t , D_B dnevno smanjenje sadržaja kisika (g/m^3) zbog razgradnje organske tvari sa dna vodotoka, R dnevno smanjenje kisika (g/m^3) zbog respiracije alga, a P dnevno povećanje kisika fotosintezom alga (g/m^3).

Ti modeli opisuju stacionarno stanje. Složeniji su dinamički modeli koji bolje opisuju stvarno stanje u vodotoku. Određivanje dovoljno pouzdanih koeficijenata, koji su sastavni dio svakog modela, osnovni su problem primjene takvih modela.

Otpadne vode ispuštaju se u vodotoke gradevinama koje se nazivaju *ušćima kanala*. Povoljnije miješanje otpadne i riječne vode postiglo bi se upotrebom difuzora postavljenih okomito na maticu vodotoka. To često nije moguće ostvariti zbog plovidbe, pa se difuzori polazu uz obalu kako bi se otpadna voda pomiješala sa što većom masom riječne vode.

Ispuštanje u jezera primjenjuje se kad nije moguće ispuštitи otpadne vode na drugi način. Kad će se ispuštati otpadne vode u jezero, ovisi o hidrografskom režimu jezera. Na mala jezera s povoljnom izmjenom ukupne mase vode i sa strujanjima koja omogućuju miješanje vode po dubini moguće je primijeniti modele slične modelima vodotoka. Velika i duboka jezera su slojevita u ljetnom i zimskom razdoblju. Zbog temperaturnih utjecaja, odnosno različite gustoće vode, stvara se gornji sloj (*epilimnion*) i donji sloj (*hipolimnion*) vode između kojih se nalazi *termoklina* (temperaturni skok). Raspoloživo je otopljenih plinova i hranjivih soli također je slojevit. U takvim jezerima ne može se računati s potpunim miješanjem vode, a niti s izmjenom ukupne mase jezerske vode. Zbog taloženja organske tvari i njihove razgradnje na dnu jezera povećava se koncentracija hranjivih soli u hipolimnionu, a zbog slabije osvijetljenih donjih slojeva hranjive se soli ne troše za fotosintezu.

Unošenjem organskih tvari otpadnom vodom (komunalnom, poljoprivrednom, ali i oborinskom vodom koja ispira slivno područje) povećava se masa hranjivih soli u jezeru, što pogoduje eutrofikaciju jezera.

Problemi ispuštanja otpadnih voda u jezera vrlo su složeni. U praksi se primjenjuju složeni dinamički ekološki modeli koji zahtijevaju opsežna istraživanja, ali i jednostavniji modeli. Najpoznatiji i najjednostavniji je *Vollenweiderov model* u kojem se pretpostavlja da je promjena koncentracije fosfora u jezeru ovisna o ukupnom godišnjem opterećenju jezera fosforom te o ispiranju i taloženju fosfora. Koncentracija fosfora u jezeru u trenutku t određuje se iz izraza

$$P_t = \frac{L}{z(\sigma + \frac{1}{\tau})} \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\sigma + \frac{1}{\tau} \right)t \right] \right\} + P_0 \exp \left[-\left(\sigma + \frac{1}{\tau} \right)t \right], \quad (38)$$

gdje je L godišnje opterećenje jezera fosforom (g/m^3), z srednja dubina jezera (m), σ godišnje taloženje, τ trajanje izmjene ukupnog obujma jezerske vode (god.), a P_0 početna koncentracija fosfora u jezeru (g/m^3).

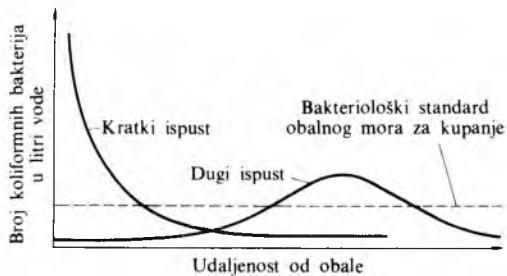
Mnogi se istraživači slažu da je fosfor kritičan element za pojavu eutrofikacije jezera. Smatra se, međutim, da dušik i ugljik koji su uz fosfor potrebni za razvoj fitoplanktona mogu biti samo u kratkom vremenu ograničavajući činiovi, jer se njihov nedostatak u vodi nadoknađuje iz atmosfere za razliku od fosfora kojemu su izvori ograničeni.

Ispuštanje u more. Način i mjesto ispuštanja ovise o hidrografskim prilikama obalnog mora, te o količini i svojstvima otpadne vode, uzimajući pri tom u obzir razgradnju otpadne tvari u moru. Razgradnjom dijela otpadne tvari u moru (samočišćenje) smanjuju se troškovi čišćenja otpadne vode. Pove-

čanje sposobnosti samočišćenja postiže se razrjeđivanjem otpadne vode i naknadnom disperzijom.

Može se ispuštati razrijedena otpadna voda samo u onim dijelovima mora gdje postoje povoljna dinamička izmjena morske vode, povoljno strujanje, dovoljna dubina mora, prozirnost i oligotrofni stupanj biološke proizvodnje. Zbog toga nije povoljno ispuštati otpadne vode u poluzavorene dijelove obalnog mora kao što su zaljevi, uvale, estuariji i kanali sa slabom izmjenom vode. Procesi samočišćenja u moru mogući su samo kad otpadne vode sadrže biološki razgradljive tvari. Razrjeđenje otpadne vode u omjeru 1:10 ima isto značenje kao učinak čišćenja otpadne vode od 90% i ima smisla samo ako postoje svi uvjeti za razgradnju razrijedene otpadne tvari. Kad se ispuštaju opasne i nerazgradljive tvari koje se gomilaju u organizmima, razrjeđenje nema vrijednosti jer se ispuštena masa otpadnih tvari smanjuje. Zbog toga kad se proračunava ispuštanje otpadnih voda stvarno mjerilo za otpadnu tvar nije koncentracija, nego količina otpadnih tvari u jedinici vremena.

Moguća su dva načina ispuštanja otpadnih voda: obalnim ili kratkim podmorskим ispuštom i dugim podmorskim ispuštom. Kad je obalno more namijenjeno kupanju, sportovima na vodi i rekreaciji, otpadne se vode ispuštaju dugim podmorskim ispuštom (sl. 54).



Sl. 54. Raspored koliformnih bakterija u morskoj vodi kod primjene kratkog i dugog ispusta za odvođenje otpadnih voda

Početno hidrauličko razrjeđenje nastaje strujanjem otpadne vode iz otvora cijevi smještene na dnu mora. Zbog početne izlazne brzine otpadne vode ona se turbulentno miješa morskom vodom, a zbog razlike u gustoći tih voda mlaz mješavine vode usmjerjen je prema površini. Kad ne postoji slojevitost po dubini zbog razlika gustoće morske vode, mješavina će vode isplivati na površinu, a kad postoji slojevitost, što je često u ljetnom razdoblju, mješavina će biti zadržana ispod gornjeg sloja manje gustoće, odnosno isplivat će samo do termokline (temperaturnog skoka).

Početno razrjeđenje ovisi o izlaznoj brzini mlaza, promjeru otvora mlaznice, omjeru gustoća otpadne i morske vode i o ubrzavanju Zemljine teže, ili točnije o omjeru inercijskih i gravitacijskih sila (Froudeova značajka), te o relativnoj dubini mora određenoj omjerom dubine i promjera otvora mlaznice. Dijagram na sl. 55 prikazuje početno razrjeđenje prema Froudeovoj značajci i prema relativnoj dubini.

Početno razrjeđenje S_1 može se izračunati pomoću izraza

$$S_1 = \frac{vbh \cos \alpha Q}{Q}, \quad (39)$$

gdje je v brzina morske struje (m/s), b duljina difuzora (m), h dubina površinskog sloja mješavine voda (m), α kut između osi difuzora i smjera morske struje, a Q dotok otpadne vode (m^3/s).

Mješavinu otpadne vode nosi morska struja, a uz istodobnu turbulentnu difuziju nastaje disperzija otpadne tvari u uzdužnom, poprečnom i vertikalnom smjeru. Iz analogije s molekularnom difuzijom može se prepostaviti da je maseni protok kroz jedinicu površine proporcionalan gradijentu koncentracije u istom smjeru, a koeficijent proporcionalnosti nazvan je koeficijent turbulentne difuzije, koji se određuje iz izraza

$$E = \alpha b^{n_0}, \quad (40)$$

gdje je $\alpha = 6,8 \cdot 10^{-5} \dots 2,3 \cdot 10^{-3}$ ($m^{2/3}/s$), a n_0 eksponent koji

ima vrijednost 1 kad je difuzija ograničena zbog blizine obale, a vrijednost $4/3$ kad nema ograničenja (otvoreno more).

Maksimalna koncentracija otpadne tvari u osi perjanice otpadne vode iznosi (prema Brooksovom jednadžbi) za $n_0 = 1$

$$C_{\max} = C_0 \operatorname{erf} \left[\frac{3/2}{\left(1 + \beta \frac{x}{b} \right)^2 - 1} \right]^{1/2}, \quad (41)$$

a za $n_0 = 4/3$

$$C_{\max} = C_0 \operatorname{erf} \left[\frac{3/2}{\left(1 + \frac{2}{3} \beta \frac{x}{b} \right)^3 - 1} \right]^{1/2}, \quad (42)$$

gdje je

$$\beta = \frac{12E}{vb}, \quad (43)$$

x udaljenost po osi perjanice otpadne vode od mjesta ispuštanja, a C_0 koncentracija otpadne tvari nakon početnog razrjeđenja, te $\operatorname{erf} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ (erf = error function).

U izrazima (41) i (42) nisu obuhvaćene biokemijske reakcije. Tim reakcijama smanjuje se koncentracija otpadnih tvari, pa koncentracija u trenutku t iznosi

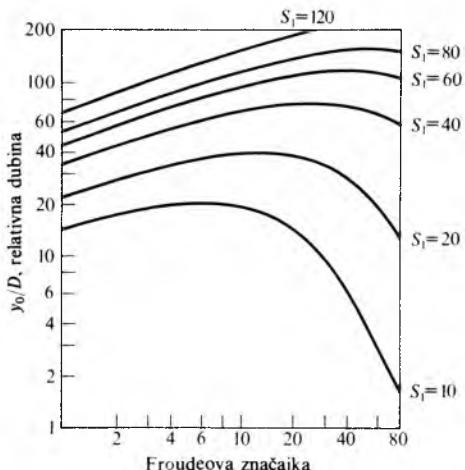
$$C_t = C_0 \exp(-Kt), \quad (44)$$

gdje je K koeficijent razgradnje.

Jedan je od kriterija za određivanje kvalitete ispuštene vode količina koliformnih organizama u litri vode. Pri razmatranju bakteriološke koncentracije koeficijent razgradnje K definira se vremenom potrebnim da ugine 90% bakterija (t_{90}). Tada je $C_t/C_0 = 0,10$, pa je iz (44)

$$K = \frac{2,3}{t_{90}}. \quad (45)$$

Vrijeme potrebno da ugine 90% bakterija određuje se ispitivanjima. U Sredozemnom moru ono iznosi 2-4 sata.



Sl. 55. Dijagram za određivanje početnog razrjeđenja pri turbulentnom miješanju. y_0/D relativna dubina (y_0 dubina vode prijamnika, D promjer otvora difuzora)

Otpadne vode ispuštaju se u more najčešće dugim podmorskim ispuštom s difuzorom. Difuzori su završni dijelovi cjevovoda s otvorima za ispuštanje otpadne vode promjera 5...20 cm.

Ispuštanje na zemljište. Otpadne vode ispuštene na zemljište mogu se iskoristiti za navodnjavanje poljoprivrednih površina, pašnjaka i šuma, za povećanje izdašnosti podzemnih voda, za povećanje protoka površinskih vodotoka prihranjuvanjem podzemnim vodama, za postizanje višeg stupnja čišćenja otpad-

nih voda i za iskorištenje hranjivih soli iz otpadnih voda u poljoprivredi.

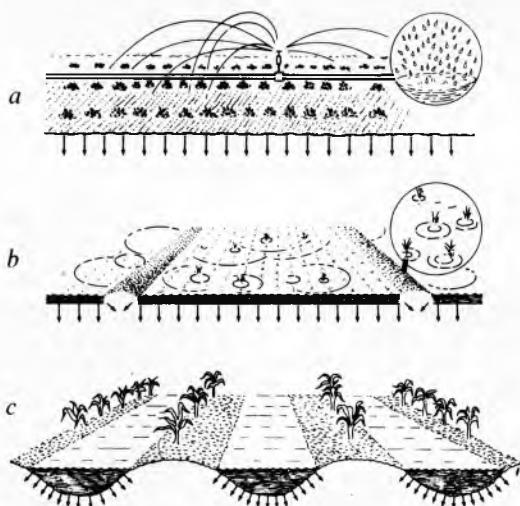
Navodnjavanje je ispuštanje otpadnih voda na zemljište, najčešće poljoprivredno, da bi se iskoristila voda i hranjive soli. Upotreboom otpadnih voda za navodnjavanje štedi se voda više kvalitete za druge namjene. Vraćanjem hranjivih soli u biokemijski ciklus (v. *Geokemija*, TE 6, str. 104) poboljšava se poljoprivredno tlo, a smanjuje se potreba za umjetnim gnojivima. Otpadne vode koje se upotrebljavaju za navodnjavanje potrebno je prethodno očistiti fizikalno-kemijskim i biološkim postupcima. Koje postupke treba primijeniti, ovisi o namjeni zemljišta koje se navodnjava.

Procjedivanjem kroz zemljište smanjuje se sadržaj organske tvari, dušikovih spojeva i fosfora. Može se opaziti da se većina metala zadržava u zemljištima kad je vrijednost $pH \approx 7$. Kontrola sadržaja teških metala u otpadnoj vodi potrebna je s obzirom na opasnost za život biljki, životinja i ljudi. Navodnjavanje otpadnim vodama može biti opasno za zdravlje ljudi. Otpadne vode mogu sadržati patogene mikroorganizme, koji se donose na zemljište, i opasne tvari, koje se mogu procijediti do podzemnih voda. Sve se to može prenijeti i na plodove.

Za zaštitu od patogenih mikroorganizama potrebno je dezinficirati otpadne vode. Osim toga, treba predvidjeti zaštitne zone širine ~ 200 m oko zemljišta koje se navodnjava, te kontrolu opasnih tvari u otpadnoj vodi i plodovima koji služe za prehranu (npr. zabrana navodnjavanja onih zemljišta na kojima se uzgaja povrće i voće koje se jede sirovo).

Količine voda koje se ispuštaju na zemljište ovise o klimatskim i pedološkim prilikama. Pri tom treba uzeti u obzir i obochine, isparivanje, transpiraciju biljki i procjedivanje. Srednje količine voda koje se ispuštaju na zemljište iznose od $2,5 \dots 10$ cm tjedno. Vrlo je često potrebno predvidjeti akumulacije u kojima se voda zadržava kad nije potrebno ili kad nije moguće navodnjavati.

Navodnjava se rasprskivanjem (kišenjem), plavljenjem ili kvašenjem iz brazda (sl. 56).



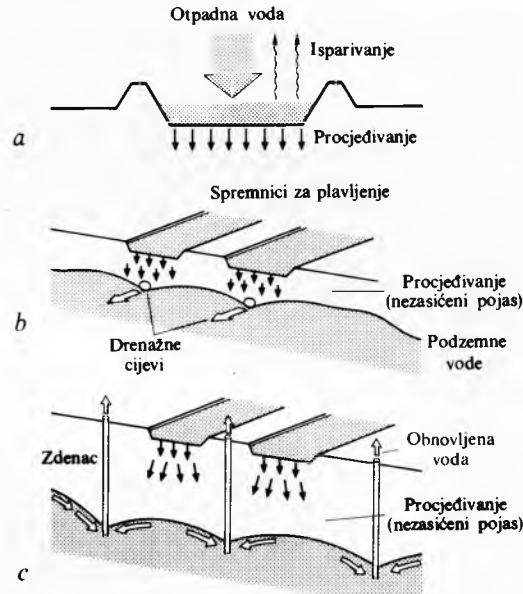
Sl. 56. Navodnjavanje otpadnom vodom. a) kišenjem, b) poplavljivanjem, c) pomoću brazda

Procjedivanje (infiltracija) otpadne vode primjenjuje se za povećanje izdašnosti podzemnih voda, odnosno za povećanje protoka površinskih voda prihranjuvanjem iz podzemnih voda. Može se primijeniti na zemljišta kroz koja se dnevno procjeduje stupac vode veći od 10 cm. To su pjeskovita i šljunkovita zemljišta. Potrebno je da razina podzemne vode bude 3 m ili više ispod površine tla.

Otpadne vode potrebno je prethodno očistiti da se iz vode uklone suspendirane i druge tvari koje bi mogle smanjiti poroznost zemljišta, i imati neugodne mirise. Može se opaziti da se procjedivanjem smanjuje broj patoloških mikroorganizama pa najčešće dezinfekcija nije potrebna.

Količina vode koja se ispušta ovisi o poroznosti i propusnosti zemljišta te o klimatskim prilikama. Voda se ispušta isprekidano, i to $10 \dots 150$ cm tjedno uz prekide od $5 \dots 20$ dana. Ispuštanje se vode prekida da bi se ozračilo zemljište po dubini i da bi se razgradile organske tvari u površinskom sloju. Procjedivanje je moguće tijekom čitave godine, pa i kad su temperature vrlo niske, pa nisu potrebne akumulacije otpadnih voda.

Vode se ispuštaju prskanjem ili kroz upojne spremnike koji na dnu imaju sloj šljunka, pijeska ili zelenila da bi se smanjio utjecaj začepljivanja (sl. 57). Povećane količine podzemne vode procjeduju se prirodno u površinske vodotoke ili pomoću drenažnih cijevi i bunara.



Sl. 57. Procjedivanje otpadne vode. a) gibanje vode, b) odvod obnovljene vode drenažnim cijevima, c) odvod obnovljene vode zdencima

Procjedene vode mogu se iskoristiti za navodnjavanje poljoprivrednih površina ili za industriju.

Akvakultura. Pod nazivom akvakultura razumijeva se čišćenje otpadne vode, ali i uzgoj biljnih i životinjskih organizama. To je moguće ostvariti na močvarnom zemljištu, u ribnjacima i u moru, pa je to istodobno mogućnost za ispuštanje otpadnih voda na zemljište i u vodne sustave.

Močvare su tla koja predstavljaju prijelaz iz vodnih sustava u kopno. U njima obično ima previše biljaka, premalo vode da bi bili dio vodnog sustava, a previše vode da se smatraju kopnom. Ispuštanjem otpadne vode, prethodno očišćene u lagunama, u prirodne ili umjetne močvare moguće je povećati proizvodnju biljki koje za svoj rast upotrebljavaju hranjive soli. Tako se dobivaju jaka proteinska stočna hrana i organska gnojiva, odnosno poboljšivači tla.

Otpadne vode ispuštaju se u niz laguna (tabl. 16), od kojih posljednja može biti ribnjak.

Tablica 16
UČINAK ČIŠĆENJA OTPADNE VODE U NIZU OD ŠEST LAGUNA SA ZADRŽAVANJEM VODE 70 DANA

Pokazatelj sastava otpadne vode	Jedinica	Otpadna voda	Voda koja istječe iz posljednje lagune	
			s ribama	bez riba
BPK	mg/L	184,0	6,0	13,0
Suspendirane tvari	mg/L	197,0	12,0	39,0
Ukupni dušik	mg/L	18,9	2,7	8,2
Ukupni fosfor	mg/L	9,0	2,1	7,6
Fekalni koliformi, najvjerojatniji broj (NVB)	(100 mL) ⁻¹	$3 \cdot 10^6$	20	200

Kontrola je opasnih tvari u otpadnim vodama koje se dovode akvakulturama posebno važna, jer postoji opasnost za zdravlje ljudi i životinja. Dosadašnja iskustva s uzgojem riba u ribnjacima pokazuju da nema opasnosti za zdravlje ljudi.

Upotreba muljeva otpadnih voda. Ostatak koncentrirane otpadne tvari naziva se muljem. U mulju su upravo oni onečišćivači zbog kojih se otpadna voda razlikuje od čistih voda. Svi muljevi sadrže vrlo visok postotak vode (više od 90%) koja povećava obujam mulja, povisuje troškove dalje preradbe i prijevoza do mjesta ispuštanja. Uklanjanje vode iz mulja jedna je od temeljnih operacija obradbe mulja. Ostali postupci obrade ovise o porijeklu i vrsti mulja te o njegovoj konačnoj namjeni.

Muljevi industrijskih otpadnih voda često sadrže opasne tvari, pa se ne mogu nekontrolirano ispuštit u okoliš. Osim toga, mnoge se tvari mogu daljom preradbi upotrijebiti kao sekundarne sirovine ili iskoristiti kao gorivo. Kad se otpadne tvari iz mulja ne mogu iskoristiti, mulj se kemijski skrućuje. Dodatkom kemijskih reagensa mulj postaje krut i postajan te se može odlagati u lagunu. Muljevi kućanskih otpadnih voda sadrže visok postotak organske tvari. Dio tih organskih tvari moguće je iskoristiti za proizvodnju plina anaerobnom digestijom.

Mulj komunalnih otpadnih voda može se iskoristiti za poboljšanje neplodnih zemljišta (tabl. 17). Ispušta se u tekućem obliku, nakon cijedenja sa sadržajem vode do 50% i u obliku suhog granulata (sadržaj vode do 10%). Primjenjuje se i zajednička obradba i ispuštanje mulja komunalnih otpadnih voda i krutog gradskog otpada (smeća), i to najčešće kao kompost.

Tablica 17
TIPIČNE KOLIČINE HRANJIVIH SOLI U STABILIZIRANOM MULJU KOMUNALNIH OTPADNIH VODA

	Postotak od ukupne suhe tvari
Organiske tvari	30-60
Dušik	1,6-6,0
Fosfor	0,65-1,75
Kalij	2,5

Patogeni mikroorganizmi koje sadrži i obrađeni mulj opasni su za zdravlje ljudi i životinja. Često je potrebna prethodna dezinfekcija mulja pasteurizacijom i pomoći vapna ili klora. Jedino je sušeni mulj (granulat) potpuno siguran u higijenskom pogledu.

Mulj komunalnih otpadnih voda ponekad sadrži teške metale (tabl. 18) i druge opasne tvari u koncentracijama koje su opasne za biljke, životinje i ljudi. To se pojavljuje kad se nedovoljno kontroliraju industrijske otpadne vode koje se dovode na komunalni uredaj za čišćenje. Sadržaj je teških metala i drugih opasnih tvari u mulju bitan kad se odlučuje o odlaganju i upotrebi mulja.

Tablica 18
KONCENTRACIJA NEFKIH METALA U MULJU KOMUNALNIH OTPADNIH VODA

Metal	Koncentracija, mg/L
Kadmij	do 1100
Kobalt	do 800
Krom	22-30000
Bakar	45-16000
Živa	0,1-89
Mangan	100-8800
Nikal	do 2800
Olovo	80-26000
Cink	51-28360

Upotreba mulja u poljoprivredi ovisi, osim o svojstvima mulja, i o geološkim, pedološkim i klimatskim prilikama te o vrsti biljke koja će se muljem prihranjivati. Kad se mulj upotrebljava za poboljšanje plodnosti zemljišta, dopuštena masa mulja po jedinici površine računa se prema količini dušika što ga biljke mogu potrošiti tijekom godine. Kad postoji višak

dušika, postoji opasnost od procjeđivanja nitrata u podzemnu vodu.

Mulj se može upotrijebiti kao gorivo, o čemu je bilo riječi kad su opisivani topinski postupci čišćenja voda.

LIT.: N. L. Nemerow, Liquid Waste of Industry, Theories, Practices and Treatment. Addison-Wesley Publishing Company, Ontario 1971. — Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, München, Düsseldorf 1973. — P. A. Vesilind, Treatment and Disposal of Wastewater Sludges. Ann Arbor Science Publishers, Michigan 1974. — H. W. Gehm, J. I. Bregman, Handbook of Water Resources and Pollution Control. Van Nostrand Reinhold Company, New York 1976. — R. L. Culp, G. M. Wesner, G. L. Culp, Handbook of Advanced Wastewater Treatment. Van Nostrand Reinhold Company, New York 1978. — A. James: Mathematical Models in Water Pollution Control. John Wiley and Sons, New York 1978. — R. A. Grace, Marine Outfall Systems. Planning, Design, and Construction. Prentice-Hall, London 1978. — Metcalf and Eddy, Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. McGraw-Hill, New York 1979. — D. W. Sundstrom, H. E. Klei, Wastewater Treatment. Prentice-Hall, London 1979. — D. Scavia, A. Robertson, Perspectives on Lake Ecosystem Modeling. Ann Arbor Science Publishers, Michigan 1979. — Water Treatment Handbook. Degremont, Rueil-Malmaison 1979. — E. B. Welch, Ecological Effects of Wastewater. Cambridge University Press, Cambridge 1980. — Metcalf and Eddy, Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater. McGraw-Hill, New York 1981. — G. M. Fair, J. C. Geyer, D. A. Okun, Elements of Water Supply and Wastewater Disposal. John Wiley, New York-London 1981.

S. Tedeschi

OTPORNOST GRAĐEVNIH MATERIJALA,

tehnička disciplina koja proučava ponašanje materijala i od njih načinjenih konstruktivnih elemenata pod djelovanjem vanjskih i unutrašnjih sila. Upotrebljava se i naziv nauka o čvrstoći (v. Nauka o čvrstoći, TE 9, str. 277). U toj se disciplini proučavaju mehanička svojstva materijala, analiziraju naprezanja i deformacije, sustavno se razvrstavaju idealni i realni materijali, zatim se ispituju takvi materijali i analiziraju konstruktivni elementi.

Jedan je od osnovnih zadataka konstruktora određivanje naprezanja i deformacija u okolišu proizvoljne točke promatranoj konstruktivnog sustava ako je poznat oblik sustava, način oslanjanja, vanjsko opterećenje i mehaničke karakteristike materijala, kako bi se moglo prići racionalnom dimenzioniranju, provjeri postojećih dimenzija ili ocjeni stabilnosti. Problem se svodi na određivanje dvaju tensorskih polja, tensora deformacije i tensora naprezanja, te njihovih međusobnih odnosa i utjecaja. Deformacije i naprezanja određeni su geometrijski jednoznačno, bez obzira na strukturu i fizikalna svojstva tijela koje je podvrgnuto deformaciji. Da bi se postavljeni problem riješio u cjelini, potrebno je uspostaviti veze između naprezanja i veličina kojima je opisana deformacija u okolišu promatrane točke tijela. Te veze zavise od mehaničkih karakteristika materijala.

Reologija je tehnička disciplina unutar koje se analizira deformacija tijela pod utjecajem vanjskih sila. Naziv reologija potječe od grčkog korijena *rheo* teći, tj. reologija je znanost o tečenju (materijala); točnije, reologija je znanost o mehaničkim svojstvima materijala. Ona se, kao tipična tehnička disciplina, oslanja na nekoliko temeljnih znanstvenih i tehničkih disciplina (mehanika kontinuma, fizika, kemija, geologija, tehnologija materijala), a u svojoj daljoj razradbi usmjerava se na proučavanje svojstava pojedinih karakterističnih materijala, tako da se razvila reologija betona, reologija čeliča, reologija polimernih materijala, reologija drva, reologija bitumena i asfalta, reologija tla i dr.

Osnovni je mehanički model u mehanički kontinuirani ili neprekidnih sredina idealan kontinuum, pa je to osnova i za istraživanje u reologiji, osobito u onom njezinu dijelu koji se naziva makroreologija, gdje se svojstva materijala promatraju iz makroaspekta, ne ulazeci dublje u strukturu tvari, ni u njena fizičko-kemijska svojstva.

U reologiji se istražuje i analizira ponašanje različitih materijala pod opterećenjem, osobito s obzirom na njihovu graničnu otpornost i nosivost.

S obzirom na složenost pojava, pri deformaciji tijela pod opterećenjem idealiziraju se stvarni fizikalni procesi. Tako se, propisujući neke analitičke veze između deformacije i naprezanja, definiraju različiti idealni materijali i različita *idealna tijela* kakvih nema u prirodi, ali kojima svojstva pod određenim uvjetima opterećenja i ostalih vanjskih utjecaja približno odražavaju ponašanje realnih materijala i tijela. To je osnova za proučavanje mehaničkih svojstava materijala i u građevinarstvu, osobito u vezi sa složenijim utjecajima gdje se kao parametri,