

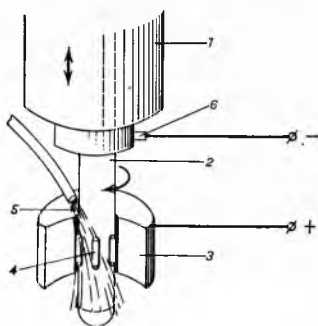
Sama konstrukcija strojeva za elektrokemijsko-mehaničko brušenje gotovo je jednaka kao strojeva koji rade na čisto mehaničkom principu. Razlika je samo u tome što su provideni još i kemijskim sistemima sličnim kao u aparatima za dubljenje eliziranjem i sličnim sistemima za napajanje električnom energijom (sl. 8). Posljednji su manjeg kapaciteta nego u aparatima za dubljenje eliziranjem (100–400 A), ali se primjenjuju slične gustoće električne struje i slični zaštitni uređaji.

Pogoni u kojima se radi sa strojevima za elektrokemijsko-mehaničko brušenje moraju imati i pomoćna postrojenja kakva se upotrebljavaju u galvanotehnici, naročito uređaje za uklanjanje vodik.

Brušenje eliziranjem ima u usporedbi sa mehaničkim brušenjem nekoliko velikih prednosti. Na prvom mjestu ono je, u cijelosti uzeto, u pogonu daleko jeftinije. Klasično brušenje (oštrjenje) alata vrši se u dvije operacije: grubo i fino brušenje; brušenje eliziranjem postiže u jednoj operaciji površinu manje hrapavu nego pri finom brušenju klasičnim postupkom (prosječna hrapavost $R_a < 1 \mu\text{m}$), a produktivnost koju omogućuje veća je nego i grubog klasičnog brušenja. Zbog odsustva pukotina i ogrebotina, oštrica je izradaka postojanija. Trajnost brusnih ploča neuporedivo je veća. Sve te prednosti opravdavaju očekivanje da će u sagledivoj budućnosti operacija brušenja eliziranjem brzo zauzimati sve važnije mjesto u obradi materijala.

Honovanje eliziranjem.

Postupci honovanja uz istovremeno eliziranje nalaze se još u razvoju. Princip izvođenja ovih operacija prikazan je shemom na sl. 9. Ovakav način honovanja izvodi se tako da se dotjerivanje na konačnu mjeru rupe vrši bez struje. Prednosti honovanja eliziranjem u usporedbi sa čisto mehaničkom operacijom jesu veliko skraćivanje trajanja operacije (do 80%), produženje trajnosti alata (300% i više) i, što je naročito važno za tankostijenke izratke, njihovo je zagrijavanje manje zbog manjeg pritiska alata. Nedostatak je postupka da su investicijski troškovi mnogo veći i da se otvor površine koja se obrađuje mora prekrivati izolacijskom masom.



Sl. 9. Princip honovanja eliziranjem. 1 Vreteno, 2 brusna glava, 3 izradak (anoda), 4 električni vodilji brusivo (katoda), 5 elektrolit, 6 dovod struje

LIT.: W. J. McGraw Tegar, The electrolytic and chemical polishing of metals, London 1959. — P. Delahay, C. W. Tobias, Advances in electrochemistry and electrochemical engineering, vol. 1, New York 1961. — H. Heilmann, Elektrochemische Bearbeitung — Grundlagen und Begriffe; H. J. Schulz, Maschinen und Einrichtungen für die elektrochemische Bearbeitung; B. Barthelme, Elektrochemisches Schleifen; J. Heyes, Elektrochemisches Badentgraten und elektrolytisches Polieren. VDI Lehrgangsbücher BW 08-2-05, Düsseldorf 1965. — J. Crawford, Electrolytic machining, u djelu: Kirk-Othmer, Encyclopedia of chemical technology, vol. 7, New York 1965. — M. A. Brimi, J. R. Luck, Electrofinishing, Amsterdam 1965. — A. E. De Barr, D. A. Oliver (editors), Electrochemical machining, London 1968.

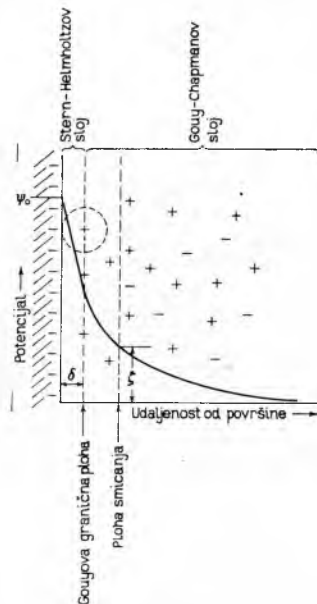
Z. Kos

ELEKTROKINETIČKE OPERACIJE, tehničke operacije koje se zasnivaju na iskorišćenju elektrokinetičkih efekata, poimence elektroosmoze i elektroforeze, za razdvajanje sastojaka disperzija.

Elektrokinetički efekti sastoje se u tome da se paralelno s granicom dviju faza koje se jedna prema drugoj relativno gibaju pojavljuje električno polje i, obrnuto, da se u električnom polju paralelnom s granicom među fazama pojavljuje relativno gibanje faza jedne prema drugoj. U prvom slučaju govori se o *potencijalu strujanja* kad polje nastaje uslijed strujanja tekuće faze preko površine čvrste faze, a o *elektroforetskom potencijalu*, *sedimentacijskom potencijalu* ili *Dornovu efektu* kad razlika potencijala nastaje uslijed gibanja čvrstih čestica (npr. pod djelovanjem sile teže) kroz tekuću fazu koja miruje. U drugom slučaju govori se o *elektroosmozi* kad se pod djelovanjem električnog polja tekuća faza giba preko čvrste površine, a o *elektroforezi* kad se u električnom polju gibaju kroz mirujuću tekuću fazu čvrste čestice. Pri pojavi elektrokinetičkih efekata može i da ne miruje

nijedna od faza; u takvom slučaju pojavljuje se istovremeno npr. elektroosmoza i elektroforeza.

Elektrokinetički efekti postaju značajni kad je površina graničnih ploha među fazama razmjerno velika, dakle prvenstveno u disperznim sistemima kao što su suspenzije, emulzije, koloidni geli i soli. Pretpostavlja se da su ti efekti (jednako kao potencijal elektroda, v. *Elektrokemija*) posljedica obrazovanja elektrokemijskog dvosloja na granicama faza disperznog sistema. Do obrazovanja elektrokemijskog dvosloja dolazi time što se dvije faze u dodiru elektriziraju raznoimenim nabojima jedna prema drugoj. [Empirijski je utvrđeno da se redovno nabije pozitivno ona faza koja ima veću dielektričnost (dielektričnu konstantu).] Sl. 1 prikazuje kako su prema Sternu u susjedstvu tako nabijene čvrste površine (na slici negativno nabijene) u tekućoj fazi raspoređeni suprotno nabijeni ioni elektrolita u dva sloja i kako se pri povećavanju udaljenosti od površine mijenja potencijal. Neposredno uz površinu čvrste faze nalazi se tzv. Helmholtzov ili Sternov sloj iona koje drži čvrsto priljubljene uz površinu kombinacija elektrostatičkih privlačnih sila i specifičnih adsorpcijskih sila poput van der Waalsovih interakcija i kemijskih veza. Pretpostavlja se da je debljina tog sloja, u kojemu potencijalna razlika prema čvrstoj površini naglo linearno opada, jednaka ionskom radijusu adsorbiranih iona. Na Helmholtzov (Sternov) sloj nadovezuje se



Sl. 1. Elektrokemijski dvosloj i elektrokinetički potencijal

Gouy-Chapmanov sloj, u kojemu na ione djeluju samo elektrostatičke sile i termičko gibanje molekula okolne tekućine, te oni obrazuju difuznu atmosferu s nabojem suprotnim neto-naboju na graničnoj plohi između Helmholtzova (Sternova) i Gouy-Chapmanova sloja (tzv. vanjskoj Helmholtzovoj plohi). (Na slici je neto-naboj Gouy-Chapmanova sloja pozitivan, jer je neto-naboj na vanjskoj Helmholtzovoj plohi negativan zbog prevladavanja negativnog naboja čvrste površine.) U Gouy-Chapmanovu sloju potencijal se s rastućom udaljenošću od vanjske Helmholtzove plohe mijenja eksponencijalno približavajući se polako vrijednosti potencijala koji se u odnosu prema površini čvrste tvari uspostavlja u glavnoj masi tekućine. Efektivna debljina κ^{-1} električnog dvosloja definirana je izrazom

$$\frac{1}{\kappa^{-2}} = \frac{8 \pi n z^2 e^2}{\epsilon k T}, \quad (1)$$

gdje je n broj iona u jedinici volumena disperzije izvan dvosloja, z valencija iona s nabojem suprotnim naboju površine, e elementarni naboj, ϵ dielektričnost, k Boltzmannova konstanta, T apsolutna temperatura. Iz tog se izraza vidi da je »debljina« dvosloja to manja ($1/\kappa^{-2}$ to veća) što je naboj »protuiona« $z e$ i koncentracija elektrolita u mediju (n) veća, što je dielektričnost ϵ manja i temperatura T niža. Najveći utjecaj ima naboj protuiona. (Usporedi članak *Elektrokemija*, str. 367.)

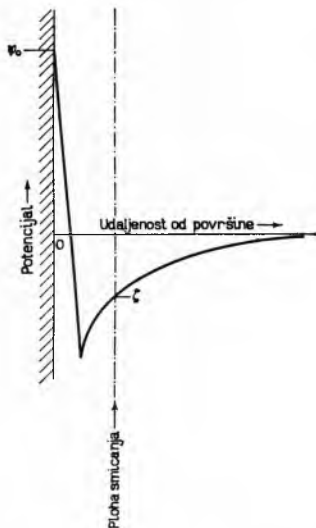
Pri relativnom gibanju tekućine u odnosu prema čvrstoj površini, Sternov sloj i jedan dio Gouy-Chapmanova sloja ostaju više ili manje nepomični na površini, te se u unutrašnjosti Gouy-Chapmanova sloja obrazuje ploha smicanja molekula tekućine koja struji prema nepomičnim molekulama. Potencijal na toj plohi smicanja naziva se *elektrokinetičkim potencijalom* ili (prema grčkom slovu zeta kojim se označuje) ζ -potencijalom (zeta-potencijalom). Ta veličina ulazi kao karakteristična za elektrokinetičke efekte u proračun svih operacija koje se na njima osnivaju.

Da bi se elektrokinetičke pojave matematički obuhvatile, elektrokemijski dvosloj promatra se kao kondenzator obrazovan od dvije paralelne ploče smještene na razmaku κ^{-1} jedna od druge.

Napon među pločama uzima se da je jednak elektrokinetičkom potencijalu ζ . Taj onda iznosi

$$\zeta = \frac{4\pi\sigma\kappa^{-1}}{\epsilon}, \quad (2)$$

gdje je σ naboj po jedinici površine.



Sl. 2. Tok potencijala u elektrokinetičkom dvosloju pri selektivnoj adsorpciji na površini elektrode

Elektroosmoza. Jednostavan slučaj elektrokinetičkog efekta predstavlja elektroosmoza u staklenoj kapilari ispunjenoj vodom i izloženoj djelovanju električnog polja paralelnog s osi kapilare. Staklo, kao supstancija znatno manje dielektričnosti nego voda, nabija se prema vodi negativno; formira se elektrokinetički dvosloj u kojem je Gouy-Chapmanov sloj pozitivan. Ako se kapilara metne u električno polje paralelno s njenom osi, pozitivne ione tog sloja privlači katoda; uslijed unutrašnjeg trenja u tekućini oni na svom putu prema katodi povlače sobom i neutralne molekule vode, nastaje *elektroosmotsko strujanje* tekućine u kapilari. Načelno istu pojavu predstavlja strujanje tekućine kroz poroznu membranu ili dijafragmu u kojoj je s pomoću elektroda smještenih s objiju strana membrane uspostavljeno električno polje okomito na ravninu njezinog protezanja.

Stacionarno stanje (konstantna brzina strujanja tekućine) pri elektroosmozi u kapilarnoj cijevi postići će se kad se izjednače elektroosmotska sila i sila unutrašnjeg trenja tekućine (odn. napon smicanja i elektroosmotska sila po jedinici površine na plohi smicanja). Napon smicanja iznosi prema Newtonovu zakonu $\tau = \eta v/d$, gdje je η koeficijent dinamičkog viskoziteta tekućine, v srednja brzina strujanja tekućine, a v/d (s dovoljnom približnošću) gradijent brzine strujanja u cijevi. Elektroosmotska sila po jedinici površine na plohi smicanja iznosi $E\sigma$, gdje je E jakost polja a σ naboj po jedinici površine plohe smicanja. U stacionarnom je stanju $E\sigma = \eta v/d$. Iz te jednadžbe i jedn. (2) dobiva se za brzinu strujanja tekućine viskoziteta η i dielektričnosti ϵ u polju jakosti E ova jednadžba:

$$v = \frac{\zeta E \epsilon}{4\pi\eta}. \quad (3)$$

(Veličina $u = \zeta \epsilon / 4\pi\eta$, nezavisna od jakosti polja, naziva se elektroosmotskom pokretljivošću.)

Ako se pusti da se tekućina nakuplja u jednom kraku kapilare oblika slova U kroz koju ona elektroosmotski struji, sumarno će strujanje prestati kad suprotni hidrodinamički protok u osi kapilare, uzrokovan hidrostatičkim natpritisom, postane jednak elektroosmotskom protoku uz stijenku kapilare. Hidrodinamički je protok prema Poiseuilleu jednak $Q_h = \pi r^4 P / 8\eta l$, gdje je r polumjer kapilare, l duljina njenog horizontalnog dijela, a P pad pritiska. Elektroosmotski je protok, prema gornjemu,

$$Q_o = r^2 \pi v = (r^2 \pi \zeta \epsilon / 4\pi\eta) E = (r^2 \zeta \epsilon / 4\eta) E.$$

Kad se oba protoka izjednače, postaje

$$\frac{E r^2 \zeta \epsilon}{4\eta} = \frac{r^4 P \pi}{8\eta l},$$

iz čega se izračunava elektroosmotski pritisak P :

$$P = \frac{2\zeta\epsilon}{\pi r^2} E l = \frac{2\zeta\epsilon}{\pi r^2} V. \quad (4)$$

Iz te se jednadžbe vidi da je elektroosmotski pritisak proporcionalan padu potencijala $V = El$ uzduž osi kapilare.

Jednadžbe (3) i (4) mogu se upotrijebiti za eksperimentalno određivanje elektrokinetičkog potencijala. Takva su određivanja pokazala da se zeta-potencijal obično kreće unutar granica $-0,05 \dots +0,05$ V.

Za približne proračune poroznih dijafragma, koje predstavljaju skup kapilara, izvedene se jednadžbe mogu upotrebljavati ako se površina presjeka kapilare $r^2 \pi$ zamijeni sumom A površina srednjih presjeka kapilara.

Elektroforeza nastupa kad se fina (npr. koloidna) disperzija nekog dielektrika u otopini elektrolita izloži djelovanju električnog polja. Pojedine se dispergirane čestice električki nabiju prema disperznom sredstvu i oko svake od njih obrazuje se elektrokinetički dvosloj kako je gore opisano. Ako je tekućina spriječena da kao cjelina struji u jednom smjeru, u električnom će se polju gibati samo nabijene čestice i one će putovati, zavisno od njihova naboja, prema katodi (*kataforeza*) ili prema anodi (*anaforeza*).

Elektroforeza može se u laboratoriju najlakše promatrati i pratiti s pomoću aparata prikazanog na sl. 3. Donji dio cijevi oblika U napuni se koloidnom otopinom ili suspenzijom; iznad nje u oba kraka cijevi nalije se čisto otapalo i u nj se odozgo zaronne platinske elektrode. Ako se između elektroda narine napon, granica između otapala i suspenzije počinje se pomicati u smjeru jedne od elektroda brzinom koja je jednaka brzini elektroforetskog gibanja čestica. Ako je granična linija vidljiva (npr. kad je disperzija obojena ili mutna) ili ako se učini vidljivom (npr. obasjavanjem ultravioletnim svjetlom), brzina se elektroforetskog gibanja na ovaj način može direktno mjeriti.

Sl. 3. Aparat za demonstraciju elektroforeze

U najjednostavnijem slučaju, slučaju elektroforeze čvrste nevodljive čestice oblika kugle u dovoljno razrijeđenoj otopini elektrolita, sili trenja koja na nju djeluje, a iznosi $F_h = 6\pi\eta r v$ (gdje je r polumjer, a v brzina čestice), drži ravnotežu električna sila EQ (gdje je E jakost polja, a Q naboj čestice). Dobiva se, dakle, da je

$$v = \frac{Q}{6\pi\eta r} E. \quad (5)$$

Potencijal u blizini nabijene površine čestice jednak je $Q/\epsilon r$; ako se pretpostavi da je on jednak elektrokinetičkom potencijalu ζ , dobiva se supstitucijom u jednadžbu (5) da je brzina elektroforetskog gibanja

$$v = \frac{\zeta \epsilon}{6\pi\eta} E. \quad (6)$$

U slučaju tekućih i vodljivih čvrstih čestica prilike su znatno zamršenije jer treba uzeti u obzir struje koje nastaju u samoj čestici pri njezinom gibanju.

Električni naboj na površini ionskih ili ionizabilnih čvrstih čestica može nastati: a) time što voda s nje selektivno uklanja pozitivne ili negativne ione; b) ionskom zamjenom s drugim ionima u vodi i c) selektivnom adsorpcijom drugih iona prisutnih u vodi. Npr. negativni naboj stakla u odnosu prema vodi nastaje uslijed toga što se s površine stakla selektivno otapaju u vodi pozitivni ioni vodik; na fino dispergiranim česticama ugljikovodika preferencijalno se adsorbiraju anioni, napose hidroksidni ioni; na česticama zemnoalkalnih karbonata dobivenih iz otopina nitrata preferencijalno se adsorbiraju kationi zemnoalkalnih metala. Površina čestica bjelanjčevina može se nabiti pozitivno ili negativno već prema tome koliko je pH (koncentracija vodikovih iona) u otopini. U vrlo kiselim otopinama (niski pH) površina se bjelanjčevine nabije pozitivno jer sadrži grupe NH_3^+ i $COOH^+$, u jako alkalnim otopinama (visoki pH) naboj je negativan od grupa NH_2^- i COO^- .

(Pri određenom srednjem pH, zvanom izoelektrična tačka dotične bjelancvine, na površini njezinih čestica nema naboja.)

U tehničkoj praksi najvažnije su primjene elektroforeze pri kojima se dispergirane koloidne čestice transportiraju do elektrode i tamo talože (elektroosmotsko taloženje). O tome zašto se čestice na elektrodi (ili u njezinoj blizini) izlučuju kad do nje stignu, postoji više teorija. Pretpostavka da je to naprosto posljedica predaje naboja vodljivoj elektrodi većinom je neodrživa, jer se čestice talože također pošto se elektroda pokrila talogom koji je električki nevodljiv i za koloidne čestice nepropustan, ili kad je polupropusnom membranom spriječen dolazak čestica do same elektrode. Prema jednoj teoriji, kad su čestice razmjerno jako udaljene jedne od drugih, odbojne sile među njihovim nabojima, koji su istog predznaka, prevladavaju nad međumolekularnim privlačnim silama, a kad su udaljenosti među česticama male, prevladavaju te privlačne sile. Stoga su razrijeđene disperzije postojane, a pri nekoj kritičnoj koncentraciji nastaje koagulacija koloidne otopine. Može se pretpostaviti da se pri elektroforezi u okolini elektrode prekoračuje kritična koncentracija, pa nastaje elektroforetsko taloženje kao posljedica međumolekularnih sila. Prema drugoj teoriji, elektroforetski talozi mogu nastati koagulacijom pod utjecajem iona u elektrodnoj tekućini, kao što su ioni vodika ili metala na anodi i hidroksidni ioni na katodi; ti ioni neutraliziraju naboj čestica disperzne faze pa nastaje koagulacija. Slojevi koagulirane disperzne faze u blizini elektrode obično su geli, pa su propusni za ione koji izazivaju koagulaciju a kreću se prema suprotnoj elektrodi. Kad ti ioni na svom putu dospiju na granicu između već nastalog taloga i glavne mase disperzije, one neutraliziraju naboj dispergiranih čestica i tako nastavljaju proces taloženja. Ovom se teorijom može objasniti stvaranje debelih nevodljivih slojeva na elektrodama. Moguće je da se pri elektroforezi odvijaju istodobno procesi predloženi i jednom i drugom od navedenih teorija, a i drugi.

Ostali elektrokinetički efekti. Na način uglavnom analogan naprijed iznijetom za elektroforezu i elektroosmozom mogu se razmatrati također potencijal strujanja i sedimentacijski potencijal. Te elektrokinetičke pojave mogu doduše imati utjecaja na neke tehničke operacije, npr. strujanje fluida kroz porozni medij ili taloženje čestica u fluidu, ali one danas ne predstavljaju osnove za posebne operacije. Stoga na ovom mjestu o njima neće više biti riječi.

Elektrokinetičke tehničke operacije dijele se, prema efektu koji u njima prevladava, na tehničku elektroosmozom i tehničku elektroforezu. Tehnička elektroosmoza primjenjuje se najuspješnije u građevinarstvu, kao elektroosmotsko odvodnjavanje tla, elektrokinetičko injektiranje, elektroosmotsko isušivanje i izoliranje zida, elektroosmotsko podmazivanje. Tehnička elektroforeza može se podijeliti na elektroforetsko taloženje i elektroforetsko frakcioniranje. Elektroforetsko taloženje upotrebljava se u procesnoj tehnici za zgušnjavanje koloidnih disperzija pod imenom *elektrodekantacija*, a u tehnici dobivanja zaštitnih i ukrasnih prevlaka na metalima i u tehnici proizvodnje tankostijenih predmeta, za dobivanje takvih prevlaka i predmeta od nemetalnog materijala. Elektroforetsko frakcioniranje ima perspektivu za dobivanje različitog biološkog materijala u čistom stanju i u količinama većim od laboratorijskih.

Ponekad se i neke operacije zvane inače elektrostatičke, kao elektrostatička precipitacija (elektrofiltracija) i elektrostatičko ličenje, ubrajaju u elektrokinetičke operacije s obzirom na to da je i u njima posrijedi migracija nabijenih čestica u električnom polju. Međutim, kako se u tim operacijama naboj čestica postiže pretežno pojačanjem polja, a elektrokinetički potencijal nema glavnu ulogu, te operacije nisu obrađene u ovom članku (v. *Elektrostatičke operacije*).

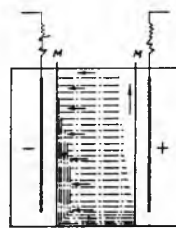
U nastavku obradit će se najprije primjena elektrokinetičkih efekata u procesnoj tehnici, tj. elektrodekantacija i elektroforetsko frakcioniranje, a onda elektroforetsko oblaganje i oblikovanje i primjena elektrokinetičkih efekata u građevinarstvu i rudarstvu.

ELEKTROKINETIČKE OPERACIJE U PROCESNOJ TEHNICI

Elektrokinetičke operacije razlikuju se od većine drugih operacija primijenjenih u kemijskoj i procesnoj tehnici za razdvajanje smjesa po tome što one za to iskoristavaju razlike u brzini jednog molekularnog procesa, a ne razlike u nekom ravnotežnom svojstvu (topljivosti, isparljivosti, adsorptivnosti, itd.). Uslijed toga učinak elektrokinetičkih operacija ovisi isključivo o apsolutnoj brzini pu-

tovanja čestica u električnom polju i o veličini razlike među brzinama putovanja pojedinih sastojina smjese (kad se elektrokinetičkom operacijom te sastojine žele razdvojiti). Budući da brzina elektrokinetičkog efekta ovisi više o prirodni električnog dvosloja na površini nabitih čestica nego o kemijskom sastavu tih čestica, razlika među brzinama putovanja dviju vrsta čestica može biti razmjerno velika iako im je kemijski sastav vrlo sličan. S druge strane, međutim, apsolutna je brzina elektrokinetičkih efekata po pravilu vrlo mala: u polju jakosti 10 V/cm iznosi obično između 0,06 i 0,6 mm/min (za usporedbu može se navesti da čestice sumpora veličine 10 μ m tonu u vodi pod djelovanjem sile teže brzinom od \sim 1,2 mm/min.) Pri tako malim brzinama iole znatniji učinak može se postići samo uz znatne troškove za instalacije i električnu energiju, pa je razumljivo što su ostali uglavnom bez trajnog uspjeha pokušaji da se elektrokinetičke operacije primijene u masovnoj preradi razmjerno jeftinog koloidnodisperznog materijala (za odvodnjavanje kaolina, gline, treseta, pigmenta, za čišćenje tutkala i želatine, za štavljenje kože, konserviranje zelene krme, impregnaciju drva, itd.). Odvodnjavanje elektroforezom imalo je dosad uspjeha u preradi kaučukova lateksa i nekih organskih kemikalija, a razdvajanje smjesa visokomolekularnih organskih spojeva ima perspektivu u proizvodnji čistog biološkog materijala.

Elektrodekantacija (elektrokonvekcija, elektrostratifikacija). Princip te operacije prikazan je shematski na sl. 4. Koloidna disperzija nalazi se između semipermeabilnih membrana M u posudi u



Sl. 4. Elektrodekantacija

kojoj se, zaronjene u pogodan elektrolit, nalaze s obiju strana elektrode + i -. Kad se te elektrode spoje s izvorom električne energije, nastaje elektroforeza (u prikazanom slučaju kataforeza) dispergiranih čestica. Kako su membrane za koloidne čestice nepropusne, ove se gomilaju kao talog uz površinu one membrane koja se ispriječila na njihovu putu. Gomilanje čestica uz membranu napreduje sve dotle dok uslijed obogaćenja suspendiranim česticama razlika između gustoće taloga i gustoće glavne mase disperzije ne postaje tolika da talog klizne po membrani naniže na dno posude (kao u prikazanom slučaju) ili ispliva na površinu tekućine, već prema tome da li je gustoća taloga veća ili manja od gustoće glavne mase disperzije. Ako se zgnusnuta disperzija stalno odvodi s dna, odn. površine, a istodobno se stalno dovodi među membrane svježa disperzija, operacija se može izvoditi kontinuirano. Uvjet je za to, međutim, da je brzina putovanja čestica u električnom polju jednaka brzini njihovog gravitacijskog gibanja naniže ili naviše. Ako je brzina gravitacijskog gibanja manja od brzine elektroforetskog putovanja čestica, čestice se zbijaju i elektroosmozom istiskuju kontinualnu fazu, pa nastupaju pojave koagulacije koje sve više usporavaju proces, dok ga na kraju ne prekinu. U tim slučajevima pribjegava se različnim protumjerama od kojih je najefikasnija obrtna polariteta za stanovito vrijeme, pa se ta mjera najviše i upotrebljava u praksi. Pri tome se talog odmiče od membrane i, kako se na taj način oslobodi od trenja uz njenu površinu, on klizne uz membranu na površinu ili niz membranu na dno i oslobađa površinu membrane za nastavak dekantacije, nakon ponovnog obrtna smjera struje u normalni. Ovaj postupak omogućava elektrodekantaciju i u slučajevima u kojima su razlike relativnih gustoća koloida i kontinualnih faza neznatne. Naravno, u svakom pojedinom slučaju postoji stanovita optimalna dežina perioda obrtna smjera električne struje; ona se obično kreće u granicama od nekoliko minuta do 1/2 sata.

Za brzinu kontinualne elektrodekantacije važna su i druga hidromehanička svojstva taloga uz membrane, koncentracija disperzne faze, brzina migracije čestica, a i gradijent električnog potencijala. Također je očito da je separacija to brža što je razlika relativne gustoće disperzne i kontinualne faze veća. Radni uvjeti biraju se prema tim veličinama. Za smanjenje viskoziteta i povećavanje brzine migracije neki autori preporučuju upotrebu površinskih aktivnih tvari.

Za operacije elektrodekantacije koloidnih otopina zadovoljavaju neutralne membrane od regenerirane celuloze dobivene od nitrata ili od ksantata (celofana), sa glatkom površinom koja je potrebna ako se želi spriječiti ponovno razrjeđivanje konvekcijom.

Za elektrodekantaciju otopina polukoloida ili koloidnih elektrolita potrebne su permselektivne membrane.

Aparatura za elektrodekantaciju. S obzirom na to da je brzina separacije pri elektrodekantaciji upravno razmjerna površini membrane, u konstrukciji aparata za provođenje ovih operacija prevladava višestanični princip. Zbog toga su ovi aparati slični onima koji se primjenjuju u elektrodijalizi, tj. građeni su po principu filter-preše.

U elektrodekantaciji bioloških tekućina, gdje treba spriječiti zagrijavanje tekućine, radne stanice se kombiniraju s rashladnim stanicama kroz koje cirkulira neka rashladna tekućina.

Industrijski aparati sadrže po stotinu i više membrana razmjerno malih dimenzija udaljenih 3...10 mm jedna od druge, pa su i pojedinačni aparati razmjerno mali. Tako male dimenzije održavaju se jer razvođenje tekućina u velikim jedinicama pravi poteškoće. Zbog toga se veća postrojenja grade od velikog broja jedinica u paralelnom spoju.

Prvi je put elektrodekantacija primijenjena u znatnijoj mjeri za koncentriranje kaučukovog lateksa. Tvrtka Dunlop Rubber Co., Ltd. poboljšala je konstrukciju opreme potrebne za tu svrhu i koristila se njome na svojim plantažama u Malaji. Kasnije je tvrtka E. I. du Pont de Nemours Co., Inc. razvila sličan proces za koncentriranje polimerizata tetrafluoretilena i na taj način dobivala koncentrate koji su sadržavali 55...75% čvrstih tvari. Elektrodekantacija primijenjena je također za čišćenje otopina šećera dobivenih izluživanjem šećerne repe i odvajanje sulfonskih kiselina od poluceluloze u otpadnoj lužini od fabrikacije sulfatne celuloze. Osim toga elektrodekantacija je perspektivna na području rekuperacije i prerade industrijskih otpadaka kao što su otpaci od bojenja i pranja tekstila.

Elektroforetsko frakcioniranje. Najznačajnija primjena elektroforeze danas je izvan tehnike, u kemiji proteina, napose u proučavanju normalnih i patološki promijenjenih tjelesnih tekućina (dakle i primjena u medicini). Za tu je svrhu A. Tiselius modificirao postupak za promatranje i praćenje elektroforeze opisan na str. 398 uvođenjem preciznog optičkog mjerenja i registriranja brzine pomicanja granice između otapala (tamponske otopine određenog pH, v. str. 398) i koloidne disperzije. Ako se tom metodom pokretne granice (engl. moving boundary method) ispituje otopina smjese bjelancevina, uslijed razlika među brzinama elektroforetskog gibanja pojedinih sastojaka smjesa obrazuje se više granica. Budući da na svakoj granici postoji razlika gustoće tekućine, i to takva da je tekućina iznad granice, zbog manje koncentracije, specifički lakša od tekućine ispod granice, spriječena je konvekcija između tih tekućina i sistem je stabilan, te može služiti za analitičko razdvajanje smjese. Umjesto da se provodi takva "frontalna analiza", sastojci se mogu separirati u odvojene zone ako se i konvekcija tekućine između granica spriječi time što se elektroforeza provodi u tekućini kojom je natopljen papir za filtriranje, trake pogodnog gela, celuloza, skrob ili staklene biserke u kolonama, i sl., ili ako se uspostavi jak gradijent gustoće tekućine uzduž kolone dodatkom šećera i dr. (Zonska elektroforeza, elektroforeza na papiru, elektrochromatografija). Zonska elektroforeza u koloni upotrebljava se i kao laboratorijska preparativna metoda time što se sadržaj kolone mehanički razdvaja po granicama zona i iz odvojenih zona izolira čisti sastojak. Pri kontinuiranoj elektroforezi na papiru uska se traka otopine koja gravitacijom struji niz filter-papir razvuče pod djelovanjem polja okomitog na smjer njezina strujanja u lepezu otopina pojedinih sastojaka, koje se otopine na donjem rubu papira mogu odvojeno hvatati. Druge laboratorijske preparativne metode elektroforeze jesu *elektrokonvekcija* i *protustrujna elektroforeza*. Pri razdvajanju smjese bjelancevina elektrokonvekcijom, otopini se najprije dočaje tamponska otopina tako da dobije pH jednak izoelektričnoj tački jednog od sastojaka smjese i onda se podvrgne elektrodekantaciji. Kad se dovrši elektrodekantacija jedne šarže, u rezervoaru na dnu posude malazič se zgusnuta smjesa svih bjelancevina osim one koja je, budući električki nenabijena, ostala nepromijenjena u otopini. Višekratnim propuštanjem kroz aparat (uz mijenjanje pH-vrijednosti) smjesa se može rastaviti na više frakcija. Protustrujna elektroforeza provodi se u tekućini koja u cijevi struji u smjeru suprotnom smjeru elektroforetskog gibanja, a brzinom većom od brzine elektroforetskog gibanja najsporijeg sastojka smjese i manjom od te brzine ostalih sastojaka. Uslijed toga najsporiji sastojak ne može dospjeti na elektrodu, nego ga struja tekućine odnosi u suprotnom smjeru i tako izdvoji iz smjese. Višekratnim propuštanjem smjese kroz aparat (sve većom brzinom) i ovom se metodom smjesa može rastaviti na više frakcija.

Za preparativnu elektroforezu u većem mjerilu dolaze u obzir metode zonske elektroforeze, elektrodekantacije i protustrujne elektroforeze. Povećanju mjerila aparata za preparativnu elektroforezu od laboratorijskog na komercijalno (od učina nekoliko mililitara na sat do učina nekoliko mililitara na minutu) suprotstavljaju se velike teškoće. Za razliku od većine drugih operacija prenosa mase, gdje se nastoji taj prenos ubrzati povećavajući turbulenciju, ovdje je problem kako turbulenciju potpuno spriječiti, da se ne bi konvekcijom ponovo izmiješale razdvojene frakcije. I inače teorije i pretpostavke koje služe za tumačenje i proračun difuzijskih operacija prenosa mase ovdje su beskorisne. Najveći problem, međutim, predstavlja uklanjanje razvite topline, koja — i kad je prati razmjerno malo povećanje temperature — uzrokujući konveksijske struje onemogućava elektroforetsko frakcioniranje. Za elektroforetsko frakcioniranje elektrokonvekcijom upotrijebljeni su aparati u biti onakvi kakvi su opisani u prikazu elektrodekantacije. Konstruirani su aparati po principu filter-preše u kojima je elektrokonvekcija kombinirana s protustrujnom elektroforezom. Pojedine nezavisne komore u aparatu obrazovane su polupropusnim membranama, a svaka komora razdijeljena je po sredini poroznom dijafragmom (paralelnom polupropusnim membranama); električno polje je okomito na ravninu membrana. Otopina koja se razdvaja ulazi odzogo u polovinu komore bližu elektrodi prema kojoj putuju nabite čestice, prolazi kroz poroznu dijafragmu i izlazi iz druge polovine komore gore. Jakost polja i brzina strujanja okomito na poroznu dijafragmu udešene su tako da najbrža komponenta smjese putuje ususret struji tekućine i taloži se na polupropusnoj membrani, a ostale komponente odnosi struja kroz poroznu dijafragmu i napolje.

Frakcioniranje elektroforezom upotrijebljeno je dosad u razmjerno maloj mjeri u komercijalnoj proizvodnji, npr. za proizvodnju čistog γ -globulina iz krvnog seruma. Ako uspije ekonomično povećati kapacitete laboratorijskih aparata od nekoliko stotina mililitara dnevno makar na nekoliko litara dnevno, elektroforeza, kao metoda kojom se obraduju osjetljivi materijali bez promjene njihovih bioloških svojstava, našla bi široku primjenu u proizvodnji hormona, antigena i antitijela, toksina, virusa, enzima i različitih polimera. Treba imati u vidu da sponost operacije za dragocjene proizvode ne mora biti presudan nedostatak. Istaknuto je, kao primjer, da za proizvodnju jedne šarže vakcine od 500 g treba doduše 2...4 tjedna, ali da ona može imati aktivitet od pola milijarde bioloških jedinica i poslužiti za cijepljenje i do jedne stotine miliona ljudi.

ELEKTROFORETSKO OBLAGANJE I OBLIKOVANJE

Elektroforetsko taloženje najviše se u praksi upotrebljava za nanošenje neke dispergirane tvari na podlogu od nekog drugog materijala (supstrata). Pri tome stanovitu ulogu ima i elektroosmoza, bar pri konsolidaciji taloga istiskivanjem u njemu sadržane kontinualne faze. Budući da pri tome nastaju obloge, ti postupci nazivaju se još i *elektroforetskim oblaganjem*.

Elektroforetsko taloženje upotrebljava se i za oblikovanje predmeta tankih stijenki. Tada se govori o postupcima *elektroforetskog oblikovanja*. Između procesa elektroforetskog oblaganja i oblikovanja nema principijelne razlike, jer se izrada proizvoda bez supstrata od izrade proizvoda koji su kombinacija supstrata i obloge razlikuje samo po tome što se pri elektroforetskom oblikovanju nakon elektroforetskog taloženja supstrat uklanja, npr. selektivnim otapanjem, a pri elektroforetskom oblaganju se to ne čini.

Svi procesi elektroforetskog oblaganja i oblikovanja u širem smislu obuhvaćaju ove skupine operacija: pripremu supstrata, pripremu medija za oblaganje, oblaganje u užem smislu i naknadnu obradu obloge. Posebno je posljednja skupina operacija (npr. toplinska obrada) važna za postizanje traženih konačnih svojstava proizvoda.

U praksi se disperzije za elektroforetsko oblaganje i oblikovanje najčešće priređuju kao koloidne i polukoloidne otopine za to uobičajenim metodama (npr. taloženjem karbonata alkalnih zemalja iz otopina njihovih topljivih soli, polimera vinil-spojiva alkoholom iz njihovih otopina u esterima), ali i drugim postupcima (npr. usitnjavanjem i uz pomoć stabilizatora, kao u priređivanju koloidnih otopina grafitu, ili polimerizacijom u emulziji, kao u priređivanju umjetnih lateksa). Uvjeti priređivanja određuju i naboj disperznih faza.

Za disperzijske medije upotrebljavaju se i voda i organske tekućine. Obje te vrste medija imaju svoje prednosti i nedostatke. Vodene disperzije nisu zapaljive ni toksične, ne zahtijevaju rekuperaciju kontinualne faze i općenito omogućavaju rad pri višim koncentracijama i time nižim naponima uz veće brzine, pa su ekonomičnije. U organskim disperzijama, pak, nema sporednih elektroodnih reakcija.

U vodenim disperzijama može doći do istovremenog odvijanja i elektroforeze i elektrolize i time do elektroodnih reakcija s poznatim posljedicama (razvijanja plinova, oksidacije ili redukcije, otapanja materijala elektroda, itd.). Neke od tih elektroodnih reakcija mogu biti štetne, a neke mogu izazvati i korisne učinke. U prvom slučaju one se moraju potisnuti ili izbjeći, a u drugom se koriste za pospješjenje i poboljšanje procesa. Najviše raširena sredstva za takve svrhe jesu membrane, obično od poroznog keramičkog materijala. S njima se mogu maksimirati korisni i minimirati štetni sporedni učinci (npr. ukĺapanje mjehurića plinova, koji su proizvodi elektroodnih reakcija, u oblogu može se spriječiti ugradnjom elektrode u takvu membranu; pri tome se ioni kreću nesmetano na svom putu, a razvijanje plinova ograničeno je na prostor između membrane i elektrode).

Od svih procesa elektroforetskog taloženja najvažniji je *oblaganje metala gumom, umjetnim smolama i plastičnim masama*, bitumenom i sl. Tim operacijama srodno je elektroforetsko lichenje.

Elektroforezom istaloženi kaučuk daje se lako vulkanizirati jer se istovremeno mogu taložiti i dodaci za proizvodnju gume, kao što su sumpor, punila, pigmenti, plastifikatori, itd., i to u jednakim omjerima jednog prema drugom i prema kaučuku u kakvim su dozirani u za taj proces priređenu disperziju.

Gustoće električne struje koje se primjenjuju u takvim postupcima kreću se oko 0,06 A/cm², a radni naponi od 10 do 100 V. Pod tim uvjetima mogu se postići neusporedivo veća iskorišćenja, računata kao količina istaložene tvari po jedinici električneta (npr. 2000 g/F i više) ili po jedinici utrošene energije (npr.

1100 g/kWh i više), nego što se mogu postići pri elektrolitičkom dobivanju metala, a čvrstoća obloga je vrlo velika.

Na sličan način mogu se dobiti obloge od polivinilklorida, polivinilidenklorida i polietilena. Za tu svrhu priređuju se lateksi od tih umjetnih smola i potrebnih dodataka precipitacijom alkoholima iz esterskih otopina. Obloge od polietilena mogu se dobiti još i iz vodenih disperzija stabiliziranih monoamidima dvobaznih kiselina. Nakon elektroforetskog taloženja svojstva tih obloga još se poboljšavaju ispiranjem, sušenjem i toplinskom obradom. U ovu skupinu postupaka ubraja se i oblaganje metala vrlo tankim filmovima od politetrafluoretilena koji služe za zaštitu ili kao «suhu mazivo».

Elektroforetsko taloženje vrlo je korisna operacija za bitumeniranje u proizvodnji i održavanju podzemnih cijevnih vodova od lijevanog željeza, jer se može izvesti bez sušenja površina s pomoću vodenih emulzija. Taj postupak naročito je prikladan za bitumeniranje unutrašnjih površina cijevi; izvodi se jednostavno tako da se u os cijevi napunjene emulzijom i spojene na anodu smjesti žica koja služi kao katoda. Pri tome se tražena debljina filma bitumena može automatski postići primjenom prikladnog radnog napona, jer s povećavanjem debljine filma raste otpor, te se smanjuje jakost električne struje; kad debljina sloja i otpor narastu uz dani napon na određene vrijednosti, jakost struje postaje vrlo mala i taloženje praktički prestaje. Bitumeniranje daljih dijelova cijevi može se tada nastaviti jednostavnim pomicanjem katode naprijed za jednu njenu dužinu.

Aparatura za elektroforetsko ličenje može biti obična posuda u kojoj se nalazi vodena emulzija sredstva za ličenje. Metalni predmet koji se liči (npr. neki dio automobilske karoserije) uronjen je u emulziju. Spajanje posude i predmeta na elektrode izvodi se već prema smjeru elektroforetskog kretanja. Prema objavljenim rezultatima ovim postupkom dobivaju se filmovi naliča odlične ujednačenosti.

Elektroforetsko oblaganje i oblikovanje vrlo su perspektivne operacije u području vrlo specijalnih metalnih proizvoda kao što su rezni alati od tvrdih metala, metalni predmeti s oblogama od nikla i kroma, torijuma, tantala, cirkonijuma, metalnih karbidâ, sulfidâ, itd.

Rezni alati od čestica volfram-karbida ugrađenih u matricu od kobalta (u nekim slučajevima i uz inkorporiranje bora) mogu se dobiti elektroforetskim taloženjem i zatim sinterovanjem. Na sličan način mogu se dobiti višeslojni filmovi od nikla i kroma i karbida niobijuma i titana na površinama predmeta od molibdena namijenjenih upotrebi na visokim temperaturama, u svrhu zaštite.

Predmeti od volframa prevučeni torijumom za specijalnu namjenu mogu se dobiti elektroforetskim taloženjem torijum-diosida na njihove površine iz suspenzije u apsolutnom alkoholu, uz dodatak malih količina sredstava za ionizaciju.

Poznata je i primjena sličnih metoda za izradu tarnih površina različitih svojstava. Tako se elementi za jako trenje od metalne matrice, npr. od nikla ili bakra i nekih tvari koje izazivaju taj učinak, npr. molibden-disulfida, ili aluminijum-oksida, mogu dobiti elektroforetskom koprecipitacijom tih materijala i oksida odgovarajućih metala i kasnijom redukcijom metalnih oksida vodikom. Na jednaki način mogu se dobiti i elementi s malim trenjem iz reducibilnih oksida ili sulfida i nereducibilnog molibden-sulfida, koji djeluje kao mazivo.

Izradi tarnih površina elektroforetskim taloženjem slični su elektroforetski postupci proizvodnje alata za brušenje. Pri tome se abrazivi kao što su karborundum ili korund mogu taložiti iz suspenzija u alkoholima, kao što je npr. 2-propanol, zajedno s oksidima metala iz kojih se zatim formira vezivo redukcijom s pomoću vodika.

Primjena elektroforetskog taloženja u proizvodnji dijelova za elektroničke aparate također je perspektivna. Tako je u proizvodnji piezoelektričnih jedinica poznat postupak nanošenja izvanredno tankih slojeva barijum-titanata elektroforezom iz disperzije u dimetil-esteru dietilenglikola, nitropropanu ili piridinu. Elektroforetskim taloženjem oksida cirkonijuma ili volframa iz disperzija u acetonu i redukcijom u vakuumu mogu se proizvesti mahovinate metalne obloge za sprečavanje kontaminacije površine mreža elektronskih cijevi metalom s površina koje emitiraju elektrone.

U ovoj tehnici primjenjuje se i metoda izrade bakrenih žica koje se mogu utaljivati u staklo. Pri tome se čestice boratnog stakla talože elektroforezom na žicu zajedno s nekim oksidnim metalnim aktivatorima (npr. bakar-oksidom) iz nekog organskog suspenzijskog medija (npr. amilacetata).

Elektroforetsko oblaganje primjenjuje se i u keramici. Postupcima koji se koriste za te svrhe mogu se npr. nanositi tanki slojevi emajla i stakla na metalne katode taloženjem iz disperzija u alkoholu. Pri tome se mogu postizati i različni dekorativni efekti izoliranjem dijelova katoda koji se ne žele emajlirati (npr. u izradi nakita).

Jedna je zanimljiva primjena elektroforetskog taloženja oblaganje keramičko-plastičnim izolacijama u proizvodnji savijljivih električnih vodiča. Pri toj proizvodnji na te vodiče se istovremeno elektroforetski talože čestice keramičkog materijala i čestice politetrafluoretilenskih smola. Nakon toga proizvod se još peče da se čestice termoplasta stale i čvrsto vežu među sobom i za čestice keramičkog materijala. Takve obloge vrlo su tanke, a ipak su potpuno nepropusne.

Elektroforetskim taloženjem i naknadnom toplinskom obradom pod visokim tlakom mogu se dobiti i folije od sintetskog tinjca iz suspenzija njegovih čestica u *n*-amilnom alkoholu, nanositi krajnje tanki slojevi luminescentnih materijala (npr. cink-sulfida aktiviranog bakrom) iz suspenzija u alkoholima koji se miješaju s vodom, ioniziranih elektrolitima, izrađivati fini žični izvori za spektrografe sa permanentnim magnetima s oblogama od europijum-oksida ili torijum-fluorida iz suspenzija tih spojeva u 2-propanolu, proizvoditi višeslojne strukture, oklopiti gorivni elementi nuklearnog reaktora i izvesti još mnoštvo drugih tehnički zanimljivih operacija slične vrste.

Kako se već može naslutiti iz nužno nepotpunog izloženog prikaza područja elektroforetskog taloženja u tehnici, ima razloga za mišljenje da se elektroforetski mogu taložiti sve, ili gotovo sve čvrste, a pored toga i mnoge tekuće tvari dovoljno postojeane pod uvjetima procesa, bez obzira na to da li su posrijedi tvari s bliskim ili vrlo različitim svojstvima. Razlog tome je okolnost da su elektrokinetički učinci primarno površinski učinci, pa se u pojavama elektroforetske migracije ispoljuju svojstva tvari adsorbiranih na površinama disperznih faza, a ne svojstva samih disperznih faza.

Jedna je od najprivlačnijih odlika elektroforetskog taloženja već naprijed spomenuta tendencija kodispergiranih materijala da se izlučuju u međusobnim omjerima manje ili više jednakim onima u kojima se nalaze u kodisperziji. To npr. omogućuje elektroforetsko taloženje kodisperzija sastojaka naliča (veziva, pigmenta, punila, razrjeđivača, itd.), elektroforetsko oblaganje kaučukom uz istodobnu vulkanizaciju, elektroforetsku proizvodnju legura koprecipitacijom metalâ, metalnih oksida, sulfida, itd., uz naknadnu obradu (npr. hidrogenacijom i/ili toplinskom obradom).

Dalja važna prednost elektroforetskog taloženja jest da se može kombinirati s postupcima elektroplatanja, te se tako mogu istovremeno ugrađivati traženi dodaci u slojeve metala koji se nanose.

Osim toga procesi elektroforetskog oblaganja pokazuju svojstvo samoregulacije. To svojstvo posljedica je okolnosti da se ne samo pri elektroforezi disperzija dielektričnih tvari (što je najčešći slučaj) nego i pri elektroforezi disperzija vodiča, kao što su grafit, metali ili drugi vodljivi materijali, uvijek radi o kretanju čestica okruženih izolatorima, ili u najmanju ruku daleko manje vodljivom površinom. Kada takve čestice dospiju na elektrodu prema kojoj se kreću, one joj povećavaju otpor, pa kako električna struja teče putem najmanjeg otpora, taloženje će biti brže na mjestima gdje je obloga tanja a sporije tamo gdje je deblja, i time će se izjednačavati razlike u debljini obloge. To svojstvo procesâ elektroforetskog taloženja vrlo je važno u oblaganju predmeta s ostrim rubovima, šavovima, udubinama, itd.

Nedostatak je postupka elektroforetskog oblaganja što stvarne obloge najčešće zahtijevaju naknadnu obradu; što su disperzije koje se pri tome upotrebljavaju krajnje osjetljive prema nečistoćama; što je za provedbu operacija potrebna specijalna električna oprema; što može lako doći do pucanja obloge za vrijeme prerade i što lako nastupaju poteškoće ako gustoća električne struje nije prikladna.

Ž. Viličić

ELEKTROOSMOZA U GRADEVINARSTVU I RUDARSTVU

Elektroosmoza upotrebljava se u građevinarstvu kao elektroosmotsko odvodnjavanje tla i potpovršinskih slojeva; kao elektroosmotsko injektiranje; kao elektroosmotsko sušenje i izoliranje zida i za specijalne svrhe (npr. kao elektroosmotsko podmazivanje).

Elektroosmotsko odvodnjavanje, injektiranje, sušenje i izoliranje često je ekonomičnije nego klasične metode izvođenja tih operacija, ali za praksu je osobito važno da je u mnogim slučajevima tek primjenom elektroosmoze rješenje nekih tehničkih zadataka postalo ekonomski moguće.

Tako je iskustvo pokazalo da finožrnata tla, tj. tereni sa koeficijentom propusnosti (filtracije) manjim od 10^{-4} cm/s, kao što su prašinaste i pješčane gline (praporna tla, zamuljeni i zagljeni pijesci, čiste gline, itd.) ne dozvoljavaju primjenu klasičnih metoda odvodnjavanja i stabilizacije. U spomenutim materijalima bunari za odvodnjavanje i iglofilteri imaju vrlo mali domet odvodnje, a time i malu efikasnost, a pri injektiranju niskotlačnim kotlićima, pumpama ili injektorima postiže se mali radijus transporta injekcijske mase uz neugodne popratne pojave kao što je raslojavanje, odizanje površinskog pokrovnog sloja, izbijanje injekcijske mase na površinu i sl. Zbog toga se u takvim slučajevima i za odvodnjavanje i za injektiranje mora jako povećati broj bušotina, odnosno bunara-iglofiltera i raditi s vrlo niskim ili enormno visokim pritisicima, odnosno s visokim vakuumom; takav je rad polagan i stoga dugotrajan, a zahtijeva upotrebu glomaznih i skupih aparatura i strojeva, veliki broj poslužilaca i glomaznu organizaciju.

Sa stanovišta područja primjene vrlo je ilustrativna sl. 5, koja pokazuje mogućnosti korištenja sirovina i metoda za zapunjavanje u ovisnosti o jednom od najkarakterističnijih faktora, koeficijentu propusnosti (prema Adamoviću i Koltunovu).

Koeficijent filtracije u cm/sek							
0,14 · 10 ⁰	0,116 · 10 ⁰	0,70 · 10 ⁻¹	0,35 · 10 ⁻¹	0,2 · 10 ⁻¹	0,23 · 10 ⁻²	0,2 · 10 ⁻³	0,2 · 10 ⁻⁵
Cement							
Silikati							
Zamrzavanje							
Elektroosmoza							

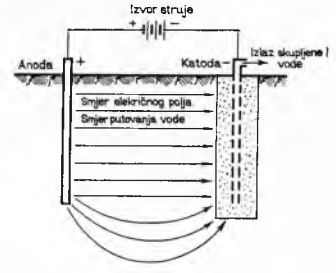
Sl. 5. Područja upotrebe injekcijskih materijala i metoda injektacije u ovisnosti o koeficijentu filtracije

U nastavku navedeni su efekti koji se mogu postići primjenom elektroosmoze u građevinarstvu i rudarstvu: 1) Odvodnjavanje terena sa sniženjem nivoa podzemnih voda; 2) dreniranje nasutih brana; 3) ubrzanje slijeganja tla; 4) učvršćenje tla kod zemljanih gradnji (stranice iskopa, ravne i kose površine nasipa, temelji nasipa); 5) sprečavanje klizanja tla (kod prirodnih i umjetnih humaka i bregova, građevnih jama); 6) sprečavanje ispiranja tla u blizini tekućih i procjednih voda; 7) zgušnjavanje tla sljepiljivanjem čestica i ispunjavanjem pora, te time stvaranje nepropusnih zavjesa; 8) povećanje nosivosti tla za temelje; 9) sprečavanje bujanja tla, tj. uklanjanje opasnosti od oštećenja objekata; 10) učvršćenje stijenci bušotina te time sprečavanje urušavanja, bujanja i zatvaranja; 11) stabiliziranje podzemnih slojeva, npr. živih pijesaka radi otvaranja okana ili izrade prolaznih hodnika i tunela; 12) sprečavanje dizanja kapilarne vlage u tlu i zidovima od betona, kamena i opeka; 13) sušenje zidova i temelja objekata izrađenih od opeka, kamena i betona; 14) navlaživanje i utiskivanje tekućih medija u finokapilarne sisteme.

Primjena elektroosmotskih postupaka bit će u nastavku ilustrirana primjerima iz prakse, ali prije toga prikazani su za svaki od tih postupaka osnovi njegove provedbe.

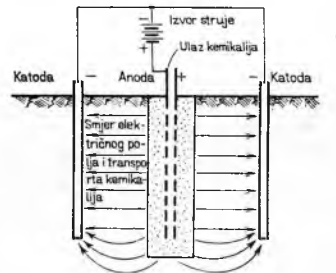
Prije dimenzioniranja bilo kakvog praktičnog elektroosmotskog sistema vrše se različita ispitivanja i mjerenja koja uvjetuju izbor metode i način rada, te su neodvojivo vezana za primjenu tehničke elektroosmoze. Ta ispitivanja sastoje se u određivanju karakteristika materijala, kao što su kemijski sastav tla i vode, granulometrijski sastav, porozitet i propusnost, indeks plastičnosti, vlažnost, električna vodljivost, prirodni potencijal i sl., u ispitivanju materijala kao elektroosmotskog medija (određivanje zeta-potencijala, elektroosmotske propusnosti i dr.), u određivanju najpovoljnijih vrijednosti pogonskih parametara (radnog napona, udaljenosti elektroda, njihove vrste i veličine, itd.) i ispitivanju vanjskih utjecaja (tlaka i temperature, promjene potencijala, promjene kemijskog sastava, trajanja procesa, itd.) na tok operacije.

Elektroosmotsko odvodnjavanje tla i potpovršinskih slojeva. Princip rada ove metode shematski je prikazan na sl. 6. Perforirana cijev, oko koje se može, ali ne mora, staviti zasip radi lakšeg i boljeg akumuliranja tekućine i njenog transporta na površinu tla, spoji se na minus-pol izvora istosmjerne struje i time postaje katoda, a anoda je metalni štap. Zbog električnog polja između elektroda voda se giba u tlu u smjeru katode, a iz sektora katode izvlači se pumpom kroz perforirane cijevi.



Sl. 6. Princip elektroosmotskog odvodnjavanja

Elektroosmotsko injektiranje modifikacija je elektroosmotskog odvodnjavanja tla pri kojoj se osmozom uvode u tlo otopine supstancija koje kemijski reagiraju s tlom ili između sebe. Takve su tvari vodeno staklo, fosforna kiselina, natrijum-karbonat, kalcijum-klorid, bakar(II)-sulfat i sl. Princip rada ove metode shematski je prikazan na sl. 7. Ulogu anode preuzela je perforirana cijev kroz koju se ubacuju kemikalije, a električno polje stvoreno izvorom istosmjerne struje uzrokuje njihovo homogeno rasprostiranje tлом u smjeru katoda koje su koncentrično postavljene oko anode.



Sl. 7. Princip elektroosmotskog injektiranja

Ima nekoliko mogućih načina rada. Kemikalije se mogu ili ubacivati stalno na jednom mjestu u anodu i upućivati prema katodi, ili izmjenično u obje elektrode uz mijenjanje polariteta elektroda. Kemikalije se mogu ubacivati ili istovremeno u mješavini ili jedna za drugom. Primijeni li se anoda od aluminijuma, ona daje, otapajući se, aluminijumske ione koji se injektiraju i reagirajući sa tлом učvršćuju njegovu strukturu.

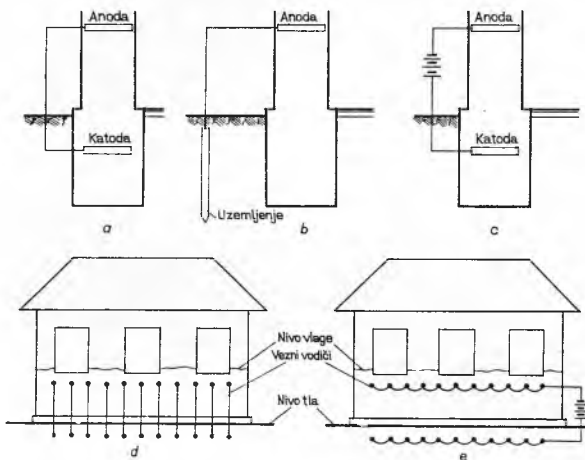
Elektroosmotsko sušenje i izoliranje zida. Tehnička elektroosmoza upotrebljava se za sušenje temelja, betonskih zidova, kamenih zidova i zidova od opeka, bez obzira na to koji je uzrok vlaženja: atmosferska vlaga i oborine, ili unutrašnja vlaga (stambena, radionična, procesna), ili kapilarna vlaga (podzemna). Ona se praktički neograničeno može primijeniti za sprečavanje vlaženja konstrukcije i uklanjanje postojeće vlage na nadzemnim i podzemnim objektima kao što su temelji (betonski, kameni) za stambene i industrijske objekte; zidovi podzemnih građevina kao što su tuneli, zemunice, podrumi, skloništa, skladišta i sl.; temelji povijesnih i arhitektonskih spomenika; fasadni i pregradni zidovi građevina kao što su stambeni i industrijski objekti, crkve, dvorci i sl.; podovi stambenih, industrijskih i povijesno ili arhitektonski zanimljivih objekata. Elektroosmotski može se uklanjati vlaga i iz ekspanata s područja likovne umjetnosti: kipova, fresaka, štukatura i sl.

Postupci se elektroosmotskog sušenja i izoliranja zida mogu podijeliti prema izvoru napona kojim se obrazuje polje na *pasivne*, pri kojima se napon stvara galvanskim djelovanjem između elektroda izrađenih od različitih metala (sl. 8 a) i *aktivne*, pri kojima se napon elektrodamama narine iz vanjskog izvora (sl. 8 c). Podvrsta pasivnog sistema je tzv. pasivni sistem s dubokim uzmljenjem, pri kojem se postiže razlika potencijala između elektroda uloženi u zid i elektroda zabijeni u tlo kraj zida do razine podzemne vode (sl. 8 b). Polaritet elektroda uvijek je takav da je smjer elektroosmotskog strujanja suprotan smjeru kapilarnog dizanja vode u zidu ili smjeru njenog normalnog putovanja. Ako je električno polje preslabo da bi se djelovanjem električnog polja obrnuo smjer putovanja vode i time zide isušilo, elektroosmotska će operacija samo usporavati ili zaustaviti ovlaživanje zidova. Aktivnom je postupku prednost u odnosu prema pasiv-

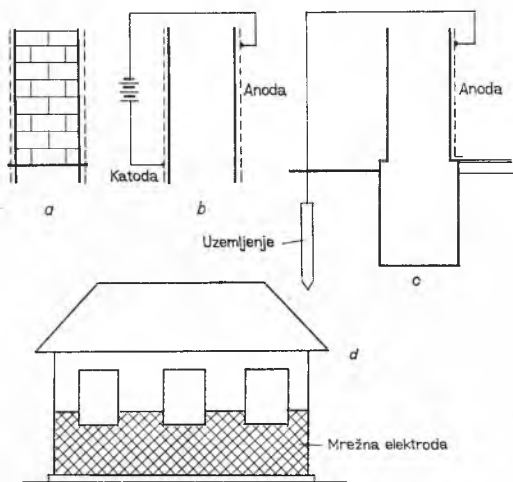
nom što se može regulirati narinuti napon i time utjecati na brzinu elektroosmotskog strujanja.

Često se kombinira aktivni s pasivnim postupkom: ugrađuju se elektrode od različitih metala i njima se narine istosmjerni napon. Pošto se na taj način zide ubrzano isušuje, izvor struje se isključi i elektrode se kratko spoje. Galvanski članak koji se tako obrazuje sprečava, ili bar usporava, ponovno navlaživanje zida kroz desetak i više godina.

Električno polje uspostavljeno u zidu može biti usmjereno ili tako da voda elektroosmotski struji u ravnini zida, odozgo dolje, prema temeljima, ili tako da struji okomito na tu ravninu, od unutrašnjosti zgrade prema fasadi (gdje treba da ishlapi).



Sl. 8. Princip elektroosmotskog sušenja zida uz uzdužni transport vode. a) Pasivni sistem, b) pasivni sistem s dubokim uzemljenjem, c) aktivni sistem, d) pasivni sistem sa pojedinačno spojenim elektrodama, e) aktivni sistem

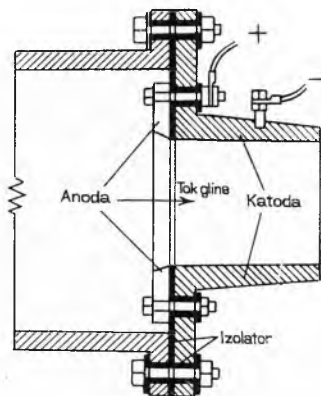


Sl. 9. Princip elektroosmotskog sušenja zida uz poprečni transport vode. a) Pasivni sistem, b) aktivni sistem, c) pasivni sistem s dubokim uzemljenjem, d) pogled na fasadu s elektrodnom mrežom

Strujanje u ravnini zida postiže se ugrađivanjem elektroda kako je prikazano na sl. 8 d i e, a da bi se ostvarilo strujanje okomito na ravninu zida, u zid treba ugraditi mrežne elektrode kako to prikazuje sl. 9. Pri varijanti s dubokim uzemljenjem (sl. 9 c) strujanje vode nije isključivo poprečno.

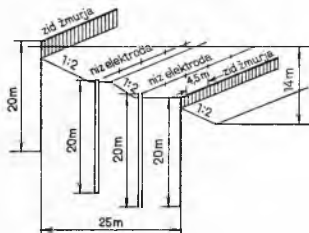
Elektroosmotsko podmazivanje. U proizvodnji opeka i teškog građevnog glinenog materijala često se upotrebljava postupak protiskivanja plastičnog glinenog mulja kroz matricu kao beskonačna traka koja se žicom razrezuje. Da se spriječi stvaranje nazubljenih rubova i smanje na minimum razlike u brzini protiskivane gline po presjeku trake uslijed trenja na matrici (koje izazivaju stvaranje slojevite strukture i time oslabljuju finalni proizvod), matrica i žica za rezanje podmazuju se vodom, parom, uljem ili emulzijama.

Pod određenim uvjetima može se voda kao sredstvo za podmazivanje transportirati iz gline na površine matrice i žica. U tu svrhu izolirana anoda u obliku prstena postavlja se unutar uređaja za protiskivanje a katoda je sama matrica. Primjenom istosmjerne struje napona 200 V, voda dovedena na katodu elektroosmotskim transportom oblaže površinu matrice i ne dozvoljava priljepljivanje gline na površinu matrice. Sistem je shematski prikazan na slici 10. Elektroosmotsko podmazivanje upotrijebljeno je i pri transportu ilovače ili glinaste zemlje da se olakša ispadanje materijala kad se on istovaruje prevrtanjem transportnih kolica.



Sl. 10. Shema sistema za elektroosmotsko podmazivanje pri proizvodnji opeka

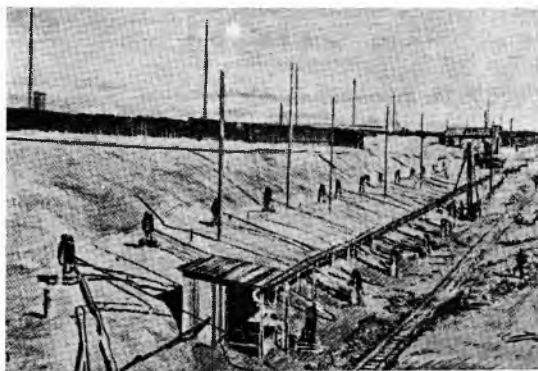
Primjeri primjene tehničke elektroosmoze u građevinarstvu i rudarstvu. Klasičan je primjer primjene tehničke elektroosmoze u svrhu odvodnjavanja izrada bunkera za podmornice u Drontheimu za vrijeme drugog svjetskog rata (1944). U tu svrhu trebalo je u blizini morske obale iskopati građevnu jamu dužine 230 m, širine 160 m i dubine 14 m, a nivo podzemnih voda nalazio se tek neznatno ispod površine tla. Tlo u kojem je trebalo izvesti građevnu jamu sastojalo se od mekanog glinovitog mulja. Iako je iskop izrađen sa stijenama nagiba 1 : 2 i premda su na krajevima građevne jame za stabilizaciju kosine u blizini krune i podnožja na razmaku od 25 m zabijena u tlo dva paralelna reda čeličnog žmurja 20 m duga i 17 m duboka, pokazalo se da u dubini temelja dolazi do pomicanja tla, a i žmurje u mekanom materijalu zasićenom vodom nije imalo nikakav oslonac. Kod dubine iskopa od 8 m pojavili su se još i hidraulički pritisci koji su onemogućili dalje izvođenje radova.



Sl. 11. Presjek građevne jame bunkera za podmornice u Drontheimu, s položajem žmurja i elektroda

Da se omogući nastavak radova, između oba niza čeličnog žmurja zabodena su u zemlju do dubine 20 m dva reda elektroda na razmacima 4, 5 i 8 m i elektrode su uključene u krug istosmjerne struje. Sl. 11 prikazuje presjek građevne jame s položajem žmurja i elektroda, a sl. 12 pogled na to. Katode su izvedene kao bunari i vezane na pumpe. Količina crpljene vode, uz 40 V napona i prosječnu jakost struje od 26 A, porasla je od 1...50 l/h na 11...479 l/h, prema tome na približno deseterostruko. Na taj je način dnevno isisano 125...130 m³ vode pa je nakon dva dana bilo moguće vršiti bez poteškoća dalje radove na iskopavanju, a na pojedinim bunarima znatno je pala izdašnost.

Elektroosmotska je metoda omogućila i na mnogim drugim objektima rješavanje različitih problema kao što su: stabilizacija stupova, upornjaka i šipova mostova, saniranje klizišta i odstranjenje temeljne vode, saniranje građevnih jama i stabilizacija nasutih brana. Za ovu posljednju primjenu u nastavku će biti detaljnije opisan primjer.



Sl. 12. Građevna jama u Drontheimu s ugrađenim žmurjem i elektrodama

Između svibnja 1963 i veljače 1966 izvedena je akumulacija i brana West Branch na rijeci Mahoning, Ohio, USA. Brana je nasuta, duga 3 km i maksimalne visine 24,4 m. U toku radova uočeno je rapidno rasprostiranje i slijeganje nasipa i objekata cjevovoda kad je nasip bio izveden do 1,5 m od projektirane krune. Brzo klizanje spriječeno je skidanjem 3,65 m debelog sloja materijala sa nasipa na dužini od 240 m. Naknadno postavljenim pijezometrima ustanovljeno je da je u temeljnom sloju gline debljine 18,5 m porni tlak vode bio 12,2 mH₂O iznad nasipa. Redukcije pritiska s vremenom nije bilo.

Na osnovu provedenih laboratorijskih ispitivanja i dobivenih rezultata prihvaćena je varijanta elektroosmotske stabilizacije radi redukcije pornog tlaka. Postavljena su tri niza anoda i katoda na dužini od 300 m; na kruni nasipa niz od 8 redova a na bermama 6 redova. Razmak između redova bio je ~6,5 m. Ukupno je postavljeno 660 anoda i 320 cijevnih katoda s dubinom ugradnje 41 m. Sve katode su povezane s crpnim sistemom a kao izvori istosmjernog napona upotrijebljeni su generatori od 90...300 kW. U punom pogonu generatori su davali 950...11 000 A uz 60...150 V. Prvi generatori startali su 10. VIII 1965 na kruni nasipa i to u zoni odvodnog kanala, kako bi se najprije u toj zoni porni tlak smanjio. Kasnije su uključeni i nizovi na bermama. God. 1966 prekinut je rad na svim sistemima, ali je na bermama 9. V 1966 nastavljen i radovi konsolidacije trajali su do 12. VIII 1966. Nakon elektroosmotske obrade, nasipavanje je nastavljeno do projektirane visine i nije ustanovljeno povećanje pornog tlaka niti opasni pokreti nasipa.

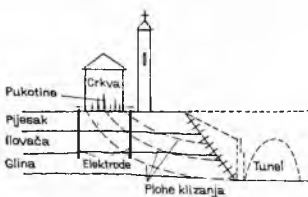
Elektroosmotska stabilizacija nasipa i kosina uzima sve više maha. U nastavku navodi se primjer primjene klasične elektroosmotske usavršene *injektiranjem*.

God. 1962 u Krasnojarsku, SSSR, gdje je došlo do propadanja pruge, provedeno je konsolidiranje tla elektroosmotskim injektiranjem.

Tlo je učvršćeno uvođenjem u nj silikata kroz cijevne elektrode dužine 1,5...2,5 m, zabite u tlo na razmacima između 0,7 i 3 m. Upotrijebljena jakost polja iznosila je 0,5...0,7 V/cm, a utrošak električne energije bio je 35 kWh/m² obradeno g tla. Po završenoj obradi pokazalo se da tlo ima 4 puta veću čvrstoću, da je stabilno prema vodi i da nije podložno deformacijama, a čestice tla su agirane.

Pri stabilizaciji temelja crkve sv. Ane u Varšavi 1949 primijejena je kombinacija elektroodvodnjavanja, *postupka s aluminijumskim elektrodama* i elektroinjektiranja. U blizini upravo dovršene crkve građen je tunel u otvorenoj jami; pri tome je nastalo duboko klizanje, koje je zahvatilo i građevinu, te se u njoj pojavio niz pukotina. Klizanje je bilo posljedica toka podzemne vode (u smjeru tunela) u temeljnim slojevima pijeska, te prašinate i masne gline.

Pošto je odlučeno da se pristupi elektroosmotskoj obradi, oko crkve je postavljen niz katodnih bunara dubine 6...8 m, a na kosini anodno polje s aluminijumskim elektrodama dugim 4...8 m. Za aktivaciju i ubrzanje odvodnjavanja postavljen je između bunara dodatni niz anoda. Djelovanjem električnog polja prosječnog napona 45 V i srednje jakosti 70 A zaustavljeno je u roku od 2 tjedna klizanje oko 4000 m³ tla. Već nakon 32 sata elektroosmotske obrade stabilizacija je bila toliko da se moglo pristupiti izgradnji naknadno planiranog potpornog zida na podnožju kosina.

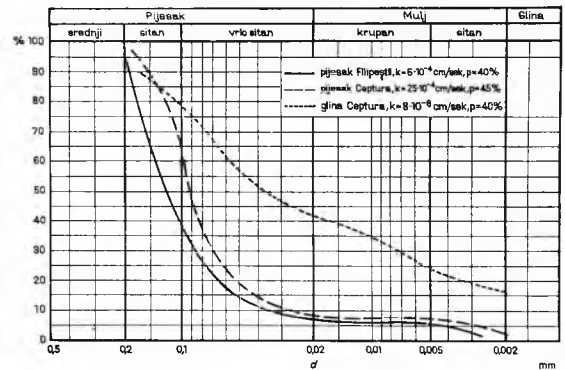


Sl. 13. Shematski prikaz položaja crkve Sv. Ane u Varšavi i smještaja elektroda u odnosu prema iskupu tunela

(prašinate glina). Konsolidacijski radovi trajali su 7 tjedana, a utrošeno je oko 3000 kWh energije, obradeno je 34 000 m³ tla na površini od 3900 m².

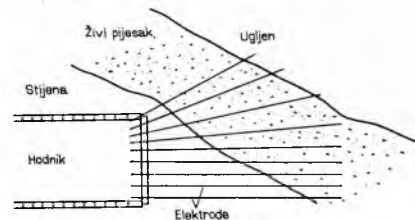
Tehnička elektroosmoza našla je primjenu i u rudarstvu za učvršćenje slojeva živih pijesaka prilikom prolaza rudničkih hodnika kroz te slojeve. Napredovanje kroz slojeve živih pijesaka uobičajenim rudarskim metodama praktički je nemoguće ili je skopčano s velikim teškoćama. Kad rudarski radovi naiđu na takve vrste tla, oni moraju često biti obustavljeni, a kad se prolaz ostvari, tempo radova je spor i njihova cijena vrlo visoka. Kao primjer ukrućivanja vodonosnog materijala elektroosmozom radi izvođenja rudarskih radova navodi se u nastavku elektroosmotsko injektiranje ostvareno u Rumunjskoj 1957/59 u oknima Filipeštii de Pedure i Ceptura. Tamo se prilikom izrade prolaznog hodnika naišlo na kosi sloj vodonosnog pijeska koji je prijetio da ispuni hodnik, onemogućujući napredovanje i dovede u opasnost

eksploataciju okna. Karakteristike tla u spomenutim oknima navedene su u dijagramu na sl. 14.



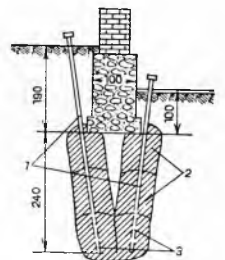
Sl. 14. Granulometrijske krivulje slojeva u oknima Filipeštii de Pedure i Ceptura

Sl. 15 prikazuje način probijanja hodnika uz pomoć elektroosmotskog injektiranja vodenim staklom. Elektrode imale su duljinu 5...6 m, a bile su koncentrično raspoređene na čelu hodnika horizontalno i koso u odnosu prema njegovoj simetriji. Budući da se rad obavljao na relativno malom prostoru, oprema je bila montirana na vagonetima radi lakšeg transporta i rukovanja; sastojala se od rezervoara za napajanje elektroda kemikalijama, električne komandne ploče, generatora istosmjerne struje, rezervoara komprimiranog zraka, kompresora za zrak, i dva rezervoara za kemikalije. Sloj živog pijeska bio je toliko čvrst da se mogao izraditi stalan prolazni hodnik s nosivom oblogom.



Sl. 15. Shematski prikaz hodnika u oknu Filipeštii de Padure s položajem elektroda za konsolidiranje

Pri nagloj i povećanoj izgradnji stambenih objekata u gradovima zgrade se ponekad moraju fundirati na slabo nosivim terenima. Klasični je način temeljenja pri tome izrada proširenih temelja. Znatno jeftinijim pokazalo se učvršćenje tla elektroosmotskom metodom. Kao primjer navodi se saniranje tla ispod temelja trokatne zgrade elektroosmotskim injektiranjem izvedeno 1962 u Lenjingradu. Sondiranje terena pokazalo je da se tlo sastoji od nasutog sloja debljine 1,6 m ispod kojeg su pronađeni tresetasti i zagljeni pijesci zasićeni vodom u sloju debljine 0,9 m, a zatim sivi glacialni sitnozrnati pijesci prosječne debljine sloja 1,8 m također zasićeni vodom, mjestimično s ostacima raslinja. Nivo podzemne vode nalazio se na dubini 1,1...1,3 m. Karakteristike pijeska bile su ove: vlažnost 32...38%; relativna gustoća 2,65...2,7; prostorna težina 1,4...1,6; koeficijent poroziteta 0,65...0,74; koeficijent filtracije $2,3 \cdot 10^{-4}$ cm/s. Temelji zgrade bili su položeni na dubini 1,9 m od površine na sitnozrnatom vodom zasićenim pijescima kojima je čvrstoća bila 1...1,5 km/cm².



Sl. 16. Shema temelja zgrade u Lenjingradu i položaja bušotina-elektroda za elektroosmotsko injektiranje. 1 Elektrode, 2 ispuna, 3 perforirani dio elektroda

Elektroosmotskom učvršćavanju podvrgnuo se sloj finozrnatog pijeska debljine 2,4 m koji se nalazio ispod temelja objekta, u ukupnom volumenu od 350 m³. Kao izvor struje upotrijebljen je motor-generator od 5 kW a radne su čelične elektrode zabijane koso ispod temelja kako je prikazano na sl. 12. Kemikalija je utrošeno 320 l po kubnom metru konsolidiranog tla. Po završenom elektroosmotskom injektiranju vlažnost tla pala je na 22...26%, čvrstoća je porasla na 3,5 kp/cm², tlo se nije moglo razmekšati u vodi.

Ekonomska je računica pokazala da je ukupna cijena radova na elektroosmotskom sistemu bila za 35% niža od cijene radova (proširenja temelja) koji se obično izvode u takvim slučajevima.

Jedna od najinteresantnijih, ali premalo primjenjivanih mogućnosti elektroosmotskog saniranja jest *učvršćenje stijenki bušotina*. Povećanje čvrstoće zidova bušotine u obodnom sloju debljine 2...3 cm postiže se načelno djelovanjem istosmjerne struje s periodičkim promjenama polariteta. Takva metoda učvršćavanja primijenjena je na terenu Baškirska (SSSR) na 22 bušotine dubine od 5 do 116 m, a ostvarena je tokom bušenja na dva načina: a) stvaranjem kore od smjese za ojačavanje koja se sastojala od gline ili pješčane gline i veznog materijala (cementa, vapna, bitumena i sl.), a uvodila se u bušotinu između rudnog sloja i aksijalno smještene cilindrične elektrode; b) elektrokemijskim učvršćenjem, u koju se svrhu upotrijebila pločasta elektroda koja se priljubila uz stijenkbu bušotine, a sama je bušotina ispunjena elektrolitom. Pri prvom postupku polaritet se mijenjao svakih 15 minuta, a proces je bio završen nakon 4...6 sati. U drugom načinu interval između promjena polariteta iznosi 1 sat, a ukupna dužina obrade 30...50 sati. Kao izvori struje upotrebljavaju se

ugrađeno ~2000 elektroda preko kojih je narinut napon od 20 do 60 V i puštena struja jakosti 20 A. U roku od 2 mjeseca objekat je bio vidljivo osušen, a nakon 4 mjeseca vlaga je bila u okvirima normalne građevinske vlage. Budući da je podzemna voda bila na dubini od ~1,6 m, a kapilaritet vrlo velik, sistem je morao biti stalno uključen; sezonske promjene nisu značajno utjecale na popratne pojave.

Na sl. 17 vidi se fasada škole u Prelogu prije i poslije elektroosmotskog sušenja i adaptacije.

Oprema. Iz navedenih primjera primjene tehničke elektroosmoze u građevinarstvu i rudarstvu uočljivo je da se za izvođenje opisanih radova primjenjuje vrlo jednostavna oprema, bez obzira na to o kojoj se metodi radi. Ona se, uz neka odstupanja od slučaja do slučaja, uglavnom sastoji od ovog pribora: bušilice i svrdla za pravljenje otvora za elektrode; uređaja za utiskivanje elektroda u mekanim tlima i smanjenje prelaznih otpora; izvora istosmjerne struje kao što su agregati, ispravljači, akumulatori; elektrodnih cijevi i šipaka izrađenih od čelika, željeza, aluminijuma, bakra itd.; veznih kabela; uređaja za odsisavanje; rezervoara i dozera za kemikalije, instrumentarija, te popratnog pribora i alata.

M. Dabić



Sl. 17. Izgled fasade škole u Prelogu prije i poslije elektroosmotskog sušenja

agregati za zavarivanje s naponom 30 V i strujom 20...30 A; trošak električne energije iznosi 10...50 kWh/m². Kao rezultati učvršćavanja u bušotini se pojavljuje cjevasta obloga koja se ne može razmočiti u vodi, a ima čvrstoću do 5 kp/cm² uz stabilitet neovisan o vremenu.

Metodama *elektroosmotskog sušenja zida i temelja* mogu se osposobljavati za upotrebu zgrade bez horizontalne izolacije i zaštititi građevinski objekti od povijesne važnosti. Metoda se proširila u nevjerojatnim razmjerima naročito u Njemačkoj, Velikoj Britaniji, Mađarskoj i Sovjetskom Savezu. U Velikoj Britaniji, npr., samo jedno poduzeće koje se bavi elektroosmotskim sušenjem izvršilo je obradu 30 000 građevinskih objekata. U Jugoslaviji je u novije vrijeme institut Geoexpert, Zagreb, u suradnji sa zagrebačkim Tehnološkim fakultetom obradio veći broj objekata.

Uspješne intervencije u Jugoslaviji izvršene su pretežno na arhitektonsko-povijesnim spomenicima kao što je npr. zgrada u Grškovićevoj ulici u Zagrebu koju je sagradio krajem XVIII st. biskup Galjuf (primjena pasivnog i aktivnog sistema); Meštovićeve galerija u Mletačkoj ulici u Zagrebu (primjena mrežnih elektroda); barokna crkva iz XVII stoljeća u Belcu. Međutim, obrađivani su i drugi objekti, od kojih se kao karakteristični navode stambena zgrada u Zoranićevoj ulici i Osnovna škola u Prelogu.

U prvom slučaju primijenjen je aktivni sistem s elektrodama od željeza i bakra, koje su nakon isušivanja kratko spojene, a napojni uređaj potpuno isključen. Postotak vlažnosti pao je u roku od 3 mjeseca sa prosječnih 19% na 4%. U drugom slučaju radilo se o velikom zahvatu na području čitave zgrade koja obuhvaća ~1500 m². Zgrada je izvedena u prošlom stoljeću u opeci s debljinom zidova od 0,1 m do 0,65 m bez ikakve horizontalne izolacije, a nivo vlage kapilarnog porijekla kretao se na 1,1...1,5 m od tla. Postotak vlage, već prema mjestima uzimanja uzoraka i mjerenja, kretao se od 5 do 20%. Nakon detaljnih ispitivanja i mjerenja na terenu i u laboratoriju odlučeno je da se provede elektroosmotsko isušivanje aktivnim sistemom s dodatnim uzemljenjem. Željezne elektrode pobijene su u nizovima u zid na određenim razmacima, spojene među sobom veznim kabelima i priključene na napojni uređaj istosmjerne struje. U zgradu je

LIT.: P. H. Prausnitz, J. Reistötter, Elektrophorese, Elektroosmose, Elektrodialyse, Dresden-Leipzig 1939. — L. Casagrande, The application of electroosmosis to practical problems in foundations of earthworks, London 1947. — Б. А. Ржаницин, Силикатизация пещаных грунтов, Москва 1949. — L. Casagrande, Electroosmotic stabilisation of soils, Cambridge, Mass., 1952. — А. К. Терешинская, Электроосмос в грунтах различной степени глинистости. Искусственное закрепление грунтов, Москва 1952. — A. Henley, ed., Electrophoresis bibliography, Silver Springs, Md., 1953. — H. J. McDonald, Ionography, Electrophoresis in stabilized media, Chicago 1955. — K. Zielinski, Zaskalenie gruntu metodą R. Gebertowicza, Warszawa 1956. — Ch. Wunderly, Die Papierelektrophorese, Methode und Ergebnisse, Aarau-Frankfurt/Main 1956. — R. J. Bally, Methode electric de imbutatire a paminturilor in lucrările de constructie, Bucuresti 1957. — R. Gebertowicz, R. Molisz, Jednoroztrowore zaskalenie gruntu pioszczystego szklem wodnym i chlorkiem wapnia, Gdańsk 1958. — Г. М. Ломизе, А. В. Немушил, Электроосмотическое водопонижение, Москва 1958. — M. Bier, ed., Electrophoresis, N. Y. 1959. — R. Audubert, S. de Mende, The principles of electrophoresis, New York 1960. — R. K. Finn, Electrophoresis, u djelu: H. M. Schoen, ed., New chemical engineering separation techniques, New York 1963. — J. F. Shyne, H. G. Schieble, Electrophoretic coatings, u djelu: F. A. Lowenheim, ed., Modern electroplating, New York 1963. — B. B. Mamsees, Сушка стен методом электроосмоса, Киев 1963. — Ashdee Corp., Anodic hydrocoating (Electrocrating), Evansville, Ind., 1964. — C. P. Gutierrez, J. S. Mosley, Electrophoretic deposition, u djelu: C. A. Hampel, ed., The encyclopedia of electrochemistry, New York 1964. — K. Weigel, Grundlagen der Lack-Elektrophorese, Mering 1966. — Г. Н. Жинкин, Электрохимическое закрепление грунтов в строительстве, Ленинград 1966. — K. Weigel, Elektrophorese-Lacke, Stuttgart 1967. — Г. Н. Жинкин, В. Ф. Калганов, Закрепление слабых грунтов в условиях Ленинграда, Ленинград 1967. — И. А. Грачев, Г. Н. Жинкин, Г. М. Рабинович, Гидроизоляция подвалов и стен зданий, Ленинград 1970.

M. Dabić Ž. Viličić

ELEKTROLIZA ALKALIJSKIH KLORIDA, u kemijskoj tehnologiji uobičajen naziv za postupke proizvodnje klora, alkalijske lužine, hipokloritā i kloratā elektrolizom otopine alkalijskih klorida. Često se pod tim nazivom, u užem smislu, razumijevaju samo postupci proizvodnje ekonomski najvažnijih od navedenih spojeva: klora i natrijum-hidroksida. U ovom članku obrađeni su samo ti postupci; za ostale v. članke *Kalijum, Klor, Natrijum*.

W. Cruikshank i H. Davy (1803) prvi su opazili da se elektrolizom otopine kuhinjske soli dobiva natrijum-hidroksid, a N. Simon i J. J. Berzelius opazili su da pri tome nastaje i klor. Kao osnova za postupak industrijske proizvodnje, međutim, elektroliza otopine alkalijskog klorida nije mogla biti uzeta u obzir prije nego što je W. v. Siemens (1865) pronalaskom dinamostroja omogućio kontinualnu proizvodnju jeftine električne energije proizvoljne jakosti.