

# TRIBOELEKTRINA V NEVÝROBNÍCH INTERIERECH, VZDUŠNÁ VLHKOST A ANTISTATICKÁ ÚPRAVA LÁTEK

## (TRIBOELECTRICITY IN INTERIERS, AIR HUMIDITY AND ANTISTATIC TREATMENT OF MATERIALS)

Zdeněk STANĚK, Luděk AUBRECHT, Jan KOLLER

Katedra fyziky, Elektrotechnická fakulta Českého vysokého učení technického v Praze, Technická 2, 166 27 Praha 6,  
tel. 4202 24352325, E-mail: stanek@fel.cvut.cz

### SUMMARY

*Triboelectricity (triboelectric effect - abbreviation TEE) is not only an uncomfortable phenomenon in several industrial plants. Triboelectric effect takes places (sometimes strongly) in flats, offices, schoolrooms and other interiors. This article is arranged with respect to above listed type of interiors due to fact, that technical methods applied in the industry are not almost efficient in interiors.*

*Brief list of most important types and methods of spontaneous charging of different bodies is presented in this article. It is shown that triboelectric effect has most notably influence. Problem of influence of humidity and temperature of the air on the humidity of matter is discussed. Influence of the air and the matter humidity on generation and development of triboelectric effect is described in the next part of the article. Elimination of undesirable triboelectric effect in non-industrial interiors is resulting from problem analysis. The aim of this paper is to refer to narrow connection of triboelectric effect with the humidity of air and materials and to methods how to eliminate or reduce the undesirable effects of TEE in non-productive interiors.*

**Keywords:** Triboelectric effect, humidity, charging, non-productive interiors

### 1. SAMOVOLNÉ ELEKTRICKÉ NABÍJENÍ LÁTEK A ELEKTRICKÉ KONTAKTNÍ JEVY

Jestliže nějaká látka (včetně osob a zvířat) se má samovolně elektricky nabíjet, musí v ní být přítomny nosiče elektrického náboje (elektrony, ionty) nebo látka musí být schopna tyto nosiče zachytit. Kromě toho musí být kladné i záporné nosiče náboje relativně volné a schopné přemístění v látce a oddělení od ní. Zdá se, že něco takového není běžné a že většina látek je vůči svému okolí elektricky neutrální, tj. kladné a záporné nosiče náboje v látce jsou v rovnováze. To je skutečně pravda, ale vůbec to neznamená, že tato rovnováha je v každém bodě uvnitř látky, popř. v každém bodě jejího povrchu. Látek s lokální dočasnou nerovnováhou elektrického náboje je mnoho a procesů, mechanismů a jevů, které jí vyvolávají, je několik. Projevují se vesměs snadno měřitelným rozdílem potenciálů. Nejvýznamnější je z nich triboelektrický jev.

### 2. PODSTATA TRIBOELEKTRICKÉHO JEVU A SOUČASNÉ ZNALOSTI O NĚM

Povrch lze pokládat za zvláštní stav látky. Je zde narušena symetrie atomové mřížky a proto se atomy a molekuly na povrchu chovají jinak než v objemu látky nebo v její těsné blízkosti. TEE je jedním z mnoha projevů tohoto stavu [3]. Patří k nejdůležitějším příčinám samovolného

elektrického nabíjení předmětů se všemi důsledky. Nejde o jev jediný. Je to dosti pestrý soubor efektů označovaný nejčastěji (a nepřiliš výstižně) termínem „statická elektřina“. TEE ovšem se skutečnou elektrostatikou, tedy fyzikální partií zabývající se chováním stacionárních a pomalu proměnných elektrických nábojů, úzce souvisí.

Před rokem 1958 byly elektrostatické efekty většinou pouhou školní kuriozitou. Nejvýznamnější výjimky byly asi dvě: Jaderný výzkum se svojí potřebou měřit elektrické náboje a velmi malé proudy a potom stroje a technická zařízení pracující s koženými řemenovými převody. Světová výstava, která se konala v roce 1958, odstartovala mj. i bouřlivý rozvoj makromolekulární chemie a tím i výroby plastických hmot. Tento trend trvá dodnes. Plasty našly uplatnění prakticky ve všech oborech lidské činnosti a dnes jsme jimi doslova obklopeni. Jejich vynikající užité vlastnosti zatlačily do pozadí i některé z jejich nepříjemných vlastností. Jsou to např. „chytání“ špíny a prachu a „lepení“ drobných tělísek různých látek. Patří sem dále nemožnost snadno od sebe oddělit folie a vlákna a při násilném oddělení tvorba jisker a různého „světélkování“. Náleží sem i nepříjemné „rány“, které osoby utrpí při dotyku s běžnými předměty či při vzájemném podání ruky atd.

Přestože TEE patří mezi nejdéle známé projevy elektřiny, neexistuje dosud jednotná a ucelená teorie postihující všechny jeho stránky a zvláštnosti. Existuje pouze několik kvalifikovaných hypotéz,

z nichž zde některé ve velmi stručné podobě uvedeme:

- a Hypotéza o nesouměrném tření a nerovnoměrném lokálním ohřevu, který vede k poklesu výstupní práce elektronů v atomech povrchových molekul. Je to jedna z nejstarších hypotéz a zřejmě ona dala efektu jméno.
- b Hypotéza o dominantní roli spontánních elektrických dvojvrstev zdůrazňující roli třetí látky při styku. Tato hypotéza se někdy nazývá Helmholtzova.
- c Hypotéza o statistické rovnováze nosičů náboje stýkajících se látek s různou koncentrací těchto nosičů v jejich povrchové vrstvě a následném narušení této rovnováhy při oddělení látek.
- d Kuriózně vyhlížející tzv. „magma-plazma“ hypotéza, která ovšem dobře vystihuje poměry při těžkých formách tření, např. při brzdění kolejových vozidel apod. Podrobně je tato teorie uvedena v pramenech [4, 23].

V současné době se předpokládá, že TEE je celý soubor procesů závislých na materiálu kontaktních látek, jejich lokálním mechanickém stavu (hustota, pnutí, teplota) a přítomnosti látek třetích, např. zbytků katalyzátorů u polymerů, povrchových nečistot, adsorbátů a pod. Tření zde jistou roli hraje, ale není dominantní. Název TEE nebo zobecněný TEE se ovšem udržel. TEE není vázán jen na styk izolantu s izolantem. Vyskytuje se i při styku izolantů s kovy a polovodiči. U styku kovů s kovy je překryt galvanoelektrickým jevem a dalšími jevy vázanými na kovy. TEE se vyskytuje i u kapalin, plynů a par. Nejvýraznější TEE pozorujeme ovšem u syntetických polymerů nebo jiných plastických hmot.

Nejdůležitější pochod vedoucí k rozvoji TEE je zřejmě rozdělení nosičů kladného a záporného náboje. Bezprostředně potom však následuje proces opačný, tj. vyrovnání oddělených nábojů neboli relaxace (návrat ke stavu před stykem těles). To se uskutečňuje v podstatě třemi cestami: Tělesa samotnými, látkami a předměty, s nimiž jsou stýkající se tělesa v kontaktu a vzduchem, tedy vždy nějakou elektricky vodivou cestou. Předpokládáme, že elektrický odpor této cesty je  $R$ , (popř. její rezistivita je  $\rho$  a konduktivita  $\sigma$ ). Pokud tyto veličiny budeme pokládat za konstantní, bude pokles nějakého lokálního náboje  $q$  v rámci relaxačního procesu v závislosti na čase  $t$  dán výrazem:

$$q = q_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

kde  $\tau = RC$ , popř.  $\tau = \varepsilon / \sigma$  je časová konstanta označovaná někdy jako relaxační čas. (Rezistivita a konduktivita jsou navzájem reciproké veličiny, tedy  $\sigma = 1 / \rho$ ). Při tom  $q_0$  je počáteční náboj, tedy náboj, jaký má nějaká látka na počátku sledování. (Počátek sledování nebo měření nemusí být totožný s koncem dílčího triboelektrického nabíjení).  $C$  je kapacita mezi oddělenými náboji a  $\varepsilon$  je permitivita

vzduchu nebo - výjimečně - jiného prostředí, v němž TEE probíhá.

Triboelektrická redistribuce náboje obvykle dobře vyhovuje dvěma triboelektrickým neboli Coehnovým empirickým zákonům [22]:

- I. Ze dvou vzájemně se stýkajících dielektrických látek se kladně nabíjí ta, která má větší relativní permitivitu.
- II. Kontaktem (třením) dvou izolantů se uvolňuje náboj, jehož velikost je úměrná rozdílu relativních permitivit těchto izolantů.

Materiály a látky, u nichž se markantně projevuje TEE, označujeme jako triboelektricky aktivní. Tato vlastnost není, jak bude ukázáno, pro daný materiál trvalá.

Na základě prvního Coehnova zákona bylo různými autory v různých dobách sestaveno několik tzv. triboelektrických řad látek [22]. Tyto řady však nepodávají příliš spolehlivý obraz o triboelektrickém nabíjení. Nemohou totiž zohledňovat okamžitý stav povrchů a přítomnost třetích látek na nich jakož i vliv parametrů prostředí. (Také se do nich těžko zařazují nově vyvinuté materiály). Posledně jmenovaný faktor, zejména vzdušná vlhkost, jak bude ukázáno, se na nabíjení osob a látek podílí významným způsobem.

Rozdíl potenciálů při triboelektrickém samovolném nabíjení látek a osob v nevýrobních interiérech dosahuje až několika desítek kV. Tak např. povstání osoby ze židle s kovovou kostrou vyvolá napětí mezi touto kostrou a osobou běžně 20 – 30 kV. Jestliže za této situace a jí podobných dojde k dalšímu nárůstu nehomogenity takto vzniklého elektrického pole (např. přiblížení ruky ke kovové části židle), jsou obvykle splněny podmínky pro rozvoj elektrického výboje typu lavina, který může přejít ve výboj typu kondenzovaná jiskra.

Triboelektricky uvolněné náboje lokalizované na předmětech mohou v blízkých vodičích vyvolávat protináboje a tím i lokální elektrická pole také bezkontaktní cestou a to prostřednictvím elektrostatické indukce.

Z uvedeného plyne, že TEE je v nevýrobních interiérech zdaleka nejvýznamnějším a zcela dominantním elektrickým kontaktním jevem.

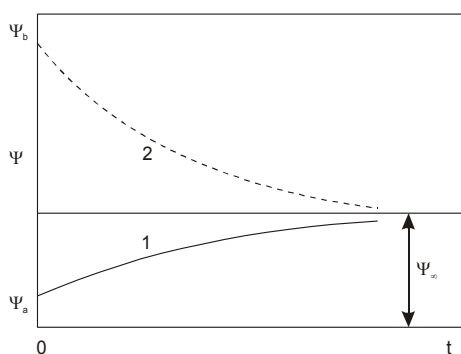
S existencí elektrických dvojvrstev souvisí s největší pravděpodobností ještě další efekty. Patří sem tzv. baloelektrický neboli Lenardův jev II. Ten spočívá v tom, že při třštění vody její nejjemnější kapičky (u jiných kapalin tento jev buď vůbec neexistuje nebo je málo výrazný) mají záporný elektrický náboj a velké kapky kladný. Pokusy o vysvětlení v podobě hypotéz lze nalézt v [3, 11, 18].

Nabíjení dielektrických kapalin při jejich proudění či výtoku z potrubí lze pokládat za formu TEE. Totéž lze prohlásit o elektrickém náboji respiračních plynů [19]. Poněkud komplikovanější je pravděpodobně podstata uvolňování elektrických nábojů v parních turbínách [20].

### 3. VLHKOST VZDUCHU, LÁTEK A MATERIÁLŮ

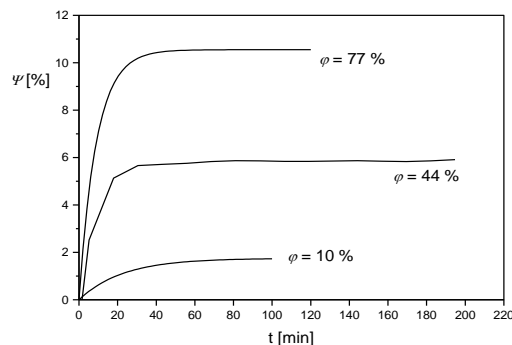
Hlavním zdrojem vlhkosti pevných látek a materiálů je nejčastěji atmosféra, v níž se látka nachází. (Rozlišujeme navlhavost a nasákavost což je příjem vody látkou, která je v ní ponořena). Při styku pevné látky se vzduchem obsahujícím vodní páru nastávají dva děje. Je to adsorpce vody na povrchu a absorpce uvnitř [16]. Souhrnně se oba děje označují jako sorpce. (V textu uvažujeme pouze sorpci fyzikální). Vnitřní složka sorpce se vyskytuje pouze u látek pórovitých. Pojem pórovitá látka při tom chápeme ve smyslu definice v pramenu [8]. Příčinou adsorpce jsou síly působící mezi molekulami pevné látky a vody.

Uvedené pochody se nazývají navlhavost látek. Její počátek, tedy počátek sorpčních pochodů, souvisí s povahou a velikostí pórů. Navlháním předmětu (látky) uloženého v prostředí (vzduchu) o konstantní vlhkosti  $\varphi$  a konstantní teplotě se v něm původní množství vlhkosti v jednotce hmoty  $\Psi_0$  s časem postupně zvětšuje podle vzrůstající křivky 1 na obr. 1 [1, 2, 15] a asymptoticky se přibližuje k určitému rovnovážnému stavu  $\Psi_\infty$ . Ten odpovídá právě vlhkosti prostředí  $\varphi$ . Opačný pochod, pokles vlhkosti předmětu s časem, vyjadřuje klesající křivka 2 na obr. 1. Na velikost rovnovážné vlhkosti v uvažovaném předmětu mají vliv podstata a struktura materiálu a zejména teplota a vlhkost okolního vzduchu. Pro různé teploty dostaneme různé průběhy nárůstu a poklesu vlhkosti materiálu. Křivky na obr. 1 jsou tedy parametrické izotermy. Parametrem je vlhkost vzduchu jak to ukazují křivky na obr. 2 pro konkrétní materiál [1].



**Obr. 1** Navlhání a vysoušení papíru při dané vlhkosti a teplotě

**Fig. 1** Moistening and drying-out of paper at given humidity and temperature



**Obr. 2** Časový průběh navlhání (nárůstu obsahu vody) u papíru s různou relativní vlhkostí  
**Fig. 2** Time course of growth of water content for paper with various relative humidity

Adsorbovaná vrstva vody se obvykle stává elektrolytem následkem disociace nečistot na povrchu látky a polárních molekul obsažených v pevné látce samé. V pórech, trhlínách a mezerách mezi případnými vlákny nastává kapilární kondenzace. Dochází zde ke snížení tlaku par při němž voda ze vzduchu kondenzuje. Toto snížení je prakticky měřitelné u kapilár o průměru menším než 0,1 mm [1]. Při průměru cca 5  $\mu\text{m}$  začne vodní pára kondenzovat již při relativní vlhkosti 80 %. Kapilární kondenzace představuje konečnou fázi navlhání, která je podmíněna strukturou pórů. Voda ovšem nevniká jen do makro- a mikroskopických pórů, ale i do struktury látek kompaktních. Pro potřeby kvantifikace zde můžeme aplikovat Henryho zákon podobně jako v případě rozpouštění plynu v kapalině:

$$c = sp \quad (2)$$

Při tom uvažujeme pevnou látku ve formě vrstvy. Na její jedné straně je koncentrace vodní páry  $c$  a  $p$  je její tlak na opačné straně povrchu látky. Konstanta úměrnosti  $s$  [ $\text{s}^2\text{m}^{-2}$ ] se nazývá propustnost. V běžných pevných látkách nebývá na počátku kontaktu látky s vodní párou všude stejná koncentrace par. V tom případě difundují vodní páry z míst s větší koncentrací do míst s koncentrací nižší. Množství vody  $dQ$ , které projde za jednotku času  $dt$  plochou  $S$  kolmou na směr jejího postupu je úměrná této ploše a gradientu koncentrace (koncentračnímu spádu). To vyjadřuje první Fickův zákon:

$$\frac{dQ}{dt} = -D.S \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (3)$$

kde  $D$  je difúzní koeficient nebo také difúzní konstanta [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ] a  $x$  je souřadnice ve směru postupu vodních par. Záporné znaménko u difúzního koeficientu značí, že difúze směřuje z oblasti vyšší koncentrace do oblasti koncentrace nižší. Druhý

Fickův zákon popisuje časovou změnu koncentrace molekul vodní páry úměrnou změně spádu koncentrace v místě  $x$ . Vztahuje se tedy na neustálý proces prolínání vodní páry homogenní pevnou látkou:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Jestliže vlhkost proniká vrstvou pevné látky tloušťky  $h$  z jedné strany, na níž je tlak vodních par  $p_1$ , na druhou stranu s tlakem vodních par  $p_2$ , potom v ustáleném stavu projde vrstvou pevné látky za jednotku času konstantní množství vodní páry. Velikost tohoto množství je dána řešením

II. Fickova zákona pro  $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$ . Za čas  $t$  projde plochou  $S$  množstvím

$$Q = DS \frac{c_1 - c_2}{h} t. \quad (5)$$

Při tom koncentrace  $c_1$  a  $c_2$  jsou dány Henryho zákonem:

$$c_1 = s p_1, c_2 = s p_2 \quad (6)$$

Po dosazení  $c_1$  a  $c_2$  do (5) za současného spojení materiálových konstant  $D$  a  $s$  v konstantu jednu ( $Ds = P$ ) dostáváme

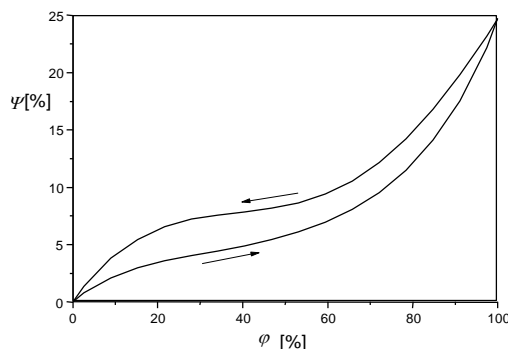
$$Q = PS \frac{p_1 - p_2}{h} t. \quad (7)$$

Veličina  $P$  se nazývá součinitel propustnosti neboli permeability látky pro vodní páru. Její velikost vyjádřená z rovnice (7) je:

$$P = \frac{Q}{S \frac{p_1 - p_2}{h} t}. \quad (8)$$

Součinitel propustnosti charakterizuje pevné látky z hlediska sorpce vodních par. Důvodem pro jeho zavedení je to, že je snadněji měřitelný než součinitel difúze  $D$ , jak to plyne z rovnic (7), (8). Číselně představuje  $P$  množství vodních par, které v ustáleném stavu projde jednotkovou plochou vrstvy pevné látky jednotkové tloušťky za jednotku času při jednotkovém rozdílu tlaků par na obou stranách vrstvy. Z běžných látek mají nejnižší propustnost pro vodní páru prakticky všechny plastické hmoty a to v řádovém rozsahu  $10^{-6} - 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ . Právě tyto látky patří z hlediska potlačování nežádoucího TEE mezi nejhorší. Součinitel propustnosti je zde také ovlivňován teplotou, s níž obvykle roste.

Je ovšem třeba připomenout, že konkrétní hodnoty součinitele propustnosti pro běžné látky, jaké se vyskytují v nevyrobních interiérech, nejsou známy a tabelárně zpracovány. V případě potřeby je nutné je změřit.



**Obr. 3** Hysterézní závislost obsahu vody v papíru na relativní vlhkosti vzduchu  
**Fig. 3** Hysteresis dependence of water content in paper on relative humidity of air

Nejvíce vody v nevyrobních interiérech vedle zdiva a omítek přijímají látky se silně polárními skupinami. Jsou to hlavně látky s OH skupinou, tedy látky na bázi celulózy (papír, lepenka, dřevo, bavlna a textilie s jejím obsahem a pod.). Vlákenná struktura celulózových materiálů zvětšuje jejich povrch a v jemných kapilárách nastává kapilární kondenzace vodních par. OH skupiny poutají vodu, takže zde zákon Henryho a oba Fickovy zákony mají omezenou platnost. Papír a bavlna následkem toho již při normální vlhkosti okolní atmosféry obsahují v rovnovážném stavu 7 až 10 % hmotnostní vlhkosti a se stoupající vlhkostí vzduchu tento obsah roste s větší rychlostí než je nárůst vlhkosti okolního vzduchu (obr. 3). Síly poutající molekuly vody k OH skupinám způsobují, že při poklesu vlhkosti okolního vzduchu se obsah vlhkosti v celulózové látce nesníží na hodnotu, jaká odpovídá rovnovážnému stavu při stejné vlhkosti vzduchu. Časové křivky navlhání a vysychání [15] vykazují hysterézi. Hysterézi také vyazuje závislost obsahu vody v látce v procentech  $\Psi$  na relativní vlhkosti okolního vzduchu  $\phi$ . Tato závislost je opět funkcí teploty. Křivky  $\Psi = f(\phi)$  pro různé teploty vzduchu se nazývají sorpční izotermy. Ukázka je na obr. 3. Navlhání probíhá podle sorpční izotermy nejrychleji na začátku a potom po dílčím zpomalení se začne asymptoticky blížit rovnovážnému stavu. Ten představuje situaci, kdy obsah vody v látce je závislý na tlaku vodních par na jejím vnějším povrchu. Navlhavost látek  $N$  se nejčastěji udává jako poměrný přírůstek hmotnosti. Jestliže má vzorek látky na počátku navlhání hmotnost  $M_0$  a na konci  $M$ , pak navlhavost je

$$N = \frac{M - M_0}{M_0} 100\%. \quad (9)$$

Čas, za který je dosaženo ustáleného stavu, je u různých látek různě dlouhý. S výjimkou celulózových a textilních materiálů to mohou být týdny i měsíce. Je to závislé především na poměru

povrchu vzorku k objemu, ale také na stupni „zestárnutí“ vzorku (viz dále). Začátek navlhání charakterizuje rychlost, již se zvětšuje množství pohlcené vody a tudíž přírůstek hmotnosti vzorku závisí pouze na velikosti jeho povrchu. Proto se navlhavost někdy vztahuje na jednotkový povrch vzorku  $S$ :

$$N = \frac{M - M_0}{S}. \quad (10)$$

Z uvedeného plyne, že navlhavost je konvenční veličina, závisící na podmínkách zkoušky a na tvaru a rozměrech vzorku. Z těchto důvodů vzájemné porovnávání látek z hlediska jejich navlhavosti není snadné.

V souvislosti s tím připomeňme, jak se u některých textilních materiálů může pod vlivem obsahu vody změnit hmotnost, aniž by látka vyvolávala na omak dojem vlhkosti: Bavlna do 20 %, len do 23 %, vlna do 40 %, hedvábní do 50 %, viskóza do 21-22 %, acetát a triacetát do cca 6 % (převzato z [12]).

V nevýrobních interiérech je aplikováno mnoho látek, které jsou záměrně hydrofobizovány. Je otázka, jak u nich posuzovat problematiku kapilární kondenzace a otázky s tím spojené. Je vhodné je posuzovat jako látky s uměle sníženým koeficientem propustnosti s tím, že toto snížení v mnoha případech je jen dočasné.

U zdíva a omítek představuje navlhání unikátní soubor problémů [7, 8], neboť tyto materiály obsahují póry ve velice širokém rozsahu rozměrů. Jelikož však zdívo za běžných okolností není triboelektricky aktivní materiál, ale jen rezervoár vlhkosti, probereme jeho vlastnosti jen velmi stručně. Vedle gradientu koncentrace se zde výrazně uplatňují, popř. mohou uplatňovat další mechanismy přenosu vody. Jsou to:

- Efúze neboli transport molekul vody v kapilárách (zejména makrokapilárách) pod vlivem lokálního tlakového rozdílu.
- Migrace vody na vnitřním povrchu makrokapilár. Příčinou jsou lokální rozdíly tloušťky povrchového filmu vody, popř. spád koncentrace v tomto filmu.
- V případě, že voda v makrokapilárách má povahu roztoku, což je splněno zejména u čerstvého zdíva, projeví se vliv koncentrace jednotlivých látek jako hnací síla difúze.
- Termodifúze, jejíž příčinou je, obvykle lokální, gradient teploty.
- Elektroforéza, která je vyvolána elektrickým polem ve zdívu. Její podstatou je transport částic látek rozpuštěných ve vodě při čemž se jako silně limitující faktor uplatňuje pohyblivost těchto částic. Efekt lze očekávat jako důsledek TEE nebo důsledek přítomnosti technických zařízení v blízkosti zdíva (TV přijímač) vyzvaný elektrostatickou indukcí.

Také sorpční izotermy různých zdících materiálů a omítek nemusí patřit vždy k základnímu typu

(obr. 3), ale mohou mít tvar odpovídající dalším čtyřem druhům [7, 8]. Pokud jde o nejjemnější kapiláry, platí zde totéž, co bylo uvedeno pro celulózové materiály.

#### 4. JAK VLHKOST VZDUCHU A LÁTEK OVLIVŇUJE ROZVOJ A PRŮBĚH TEE

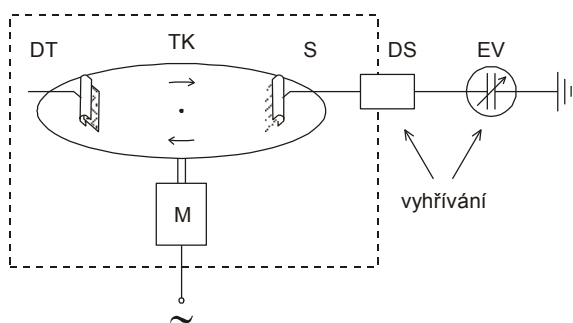
TEE, jak bylo ukázáno, je proces probíhající při kontaktu a následném oddělení dvojice látek (které mohou dokonce být co do podstaty a složení totožné). Současné uvolnění elektrického náboje je pozorovatelné pouze tehdy, když časová konstanta  $\tau$  je podstatně delší než čas během něhož oddělování vzájemně se setkávících látek probíhá. Je-li např. relativní permitivita prostředí  $\varepsilon = 1$  (vzduch) a konduktivita jedné ze stýkajících se látek  $\sigma = 1 \cdot 10^{-10} \text{ S/m}$ , pak relaxační čas bude  $\tau = 0,1 \text{ s}$ . Za této situace TEE zcela unikne pozornosti a vznikne subjektivní dojem, že látky žádný TEE nevykazují neboli jsou triboelektricky neaktivní. Hranice rozlišující triboelektřinu pozorovatelnou a nepozorovatelnou odpovídá konduktivitě  $1 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$  [13]. Prakticky lze pokládat za nepostřehnutelné triboelektrické procesy s relaxačními časy řádu prvních desítek sekund. Triboelektrická aktivita nějaké látky ovšem není stálá a neměnná. Relaxační čas, jak plyne z rovnice (1) ovlivňují okamžitá kapacita soustavy, permitivita a zejména a především konduktivita (rezistivita) stýkajících se látek. Posledně jmenované mají na rozvoj a průběh TEE rozhodující vliv, což je vyvoláno především přítomností vody na povrchu látek a blízko pod ním. Jak se zde uplatňuje elektrická vodivost vzduchu? Je běžně rozšířená představa, že vlhký vzduch je elektricky více vodivý než vzduch suchý. Ve skutečnosti je to právě naopak. Elektrická vodivost čistých i směsných plynů včetně vzduchu je způsobena přítomností nosičů elektrického náboje v nich. Molekuly vody vzhledem ke své polární podstatě se chovají jako vycytávače iontů, což má za následek pokles jejich počtu s růstem koncentrace  $\text{H}_2\text{O}$ , čili vlhkosti.

Eliminovat nebo alespoň potlačit TEE jako nežádoucí jev v nevýrobních interiérech je až dosud možno dvěma způsoby:

- Důsledně užívat podlahovin s antistatickou pravou a u textilií důsledně aplikovat aviváž. Nepoužívat užitékové předměty z běžných plastických hmot.
- Zajistit podmínky dostatečně vysoké elektrické vodivosti všech povrchů. To lze realizovat dvojitou cestou: Buď udržovat vzduch v nevýrobních interiérech na teplotě blízké se rosnému bodu (takový interiér je neobyvatelný) nebo užívat výhradně plastů speciálně upravených, jak je známe např. z obalové techniky pro komponenty počítačů (takové opatření je mimořádně finančně náročné).

Oba způsoby vyžadují od uživatele ne zcela běžné znalosti a vybavení.

Ve snaze nalézt nějaký jednoduchý a univerzální prostředek omezení TEE, byla realizována řada experimentů s triboelektricky aktivními materiály a s jejich chováním v prostředí s definovanou teplotou a vlhkostí. Schéma aparatury je na obr. 4.



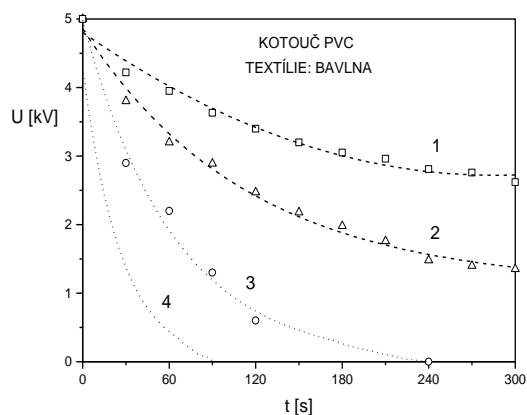
**Obr. 4** Aparatura pro experimentální vyšetření TEE na textiliích v kontaktu s různými polymery v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu. TK – třecí kotouč, DT – držák textilie, S – sběrač náboje, DS – držák sběrače (vyhříváný), EV – elektrostatický voltmetr (vyhříváný), M - motor

**Fig. 4** Apparatus for for TEE treatment on textiles in contact with various polymers

Základem je synchronním elektromotorem poháněný kotouč z plastu. Ten je výměnný a při experimentech byl z polymethylmetakrylátu, tvrdého PVC, polyetylénu a polystyrénu. O kotouč se tře vzorek textilie (vlna, bavlna, hedvábí, umělé textilie) upevněný v pružném držáku. Triboelektricky uvolněný náboj se z kotouče snímá sběračem z uhlíkového vlákna a měří se elektrostatickým kilovoltmetrem. Jiné druhy snímacích a měřicích prostředků [5, 14] se ukázaly jako méně vhodné. Elektrostatický voltmetr kapacitního typu, stejně jako průchodka držáku sběrače, jsou elektricky vyhřívány ze separátního zdroje na teplotu cca 60 °C. Experimenty byly realizovány ve speciální komoře k tomu účelu zkonstruované, v interiérech a ve venkovním prostředí za letních dnů s výrazným denním chodem teploty a vlhkosti vzduchu. Teplota a vlhkost byly měřeny klasickým Assmanovým aspiračním psychrometrem. Výsledkem experimentů jsou křivky poklesu náboje na kotouči v závislosti na teplotě a vlhkosti. Ukázky jsou na obr. 5. Z křivek 3 a 4 lze přímo číst relaxační časy. Vzhledem k charakteru křivek je ovšem často vhodnější pracovat s relaxačními poločasem. Ukázalo se, podle očekávání, že relaxační časy klesají s tím, jak se prostá teplota vzduchu blíží teplotě rosného bodu. Velikost, která tento stav dobře vystihuje je rozdíl teploty prosté a teploty rosného bodu  $\Delta T_{RB}$ . Jako hraniční se ukázala hodnota tohoto rozdílu 8 °C. Je-li menší než 8 °C, relaxační časy jsou natolik krátké, že se TEE (a také elektrostatická indukce) buď vůbec neprojevuje, nebo jen v malé míře (ztráta či pokles triboelektrické aktivity). Rozhodně nemůže dojít k rozvoji lavinového nebo jiskrového výboje.

Uvedený teplotní rozdíl není závislý na druhu kontaktních látek a tím i na polaritě náboje. Je-li  $\Delta T_{RB}$  záporná, pak se samozřejmě k prosté teplotě přičítá. Oblast záporných teplot rosného bodu ovšem odpovídá nízkým teplotám vzduchu za současně nízké relativní vlhkosti. To jsou ovšem případy pro nevýrobní interiéry většinou atypické.

Je-li  $\Delta T_{RB}$  větší než 8 – 10 °C, stává se TEE výrazným a obtížným jevem. Fyzikální vysvětlení tohoto jevu se zdá evidentní: Hlavní příčinou je kapilární kondenzace (se všemi uvedenými důsledky) u látek s nepochybně kapilární strukturou, ale také u látek zdánlivě bez kapilár (většina nepříliš opotřebovaných plastických hmot). Zde se dá předpokládat, že funkci kapilár přejímá znečištěný a mechanicky narušený povrch (poškrábání). Je třeba také připomenout, že u plastů více než u látek přírodních nastává jejich postupné znehodnocení vlivem viditelného záření kratších vlnových délek (fialové světlo) a samozřejmě i záření UV již po krátkodobých expozicích. (Detailní mechanismy jsou popsány v [9]). To se projevuje vznikem a následným silným rozvojem submikroskopických a později mikroskopických prasklin, které jsou nakonec viditelné pouhým okem. Ty se samozřejmě chovají vůči vlhkosti okolního vzduchu jako klasické kapiláry. Příkladem je fotochemické poškození laků a barev na nábytku a obrazech a



**Obr. 5** Úbytek elektrického náboje s časem (měřený jako pokles napětí na známé kapacitě) v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu a teplotě rosného bodu. 1 –  $T = 26$  °C,  $\varphi = 32$  %,  $T_{RB} = 8$  °C,  $\Delta T_{RB} = 18$  °C; 2 –  $T = 21$  °C,  $\varphi = 38$  %,  $T_{RB} = 6,2$  °C,  $\Delta T_{RB} = 14,8$  °C; 3 –  $T = 18$  °C,  $\varphi = 50$  %,  $T_{RB} = 7,5$  °C,  $\Delta T_{RB} = 11,5$  °C, 4 –  $T = 17$  °C,  $\varphi = 64$  %,  $T_{RB} = 10$  °C,  $\Delta T_{RB} = 7$  °C.

**Fig. 5**

Decrease of electrical charge with time (measured as voltage drop on the known capacity)

změna barvy běžných předmětů, které byly i zcela krátce ozářeny slunečním světlem. Zdálo by se, že v interiérech k poškozování (stárnutí) materiálů pod

vlivem slunečního záření nemůže docházet. Ve skutečnosti k němu dochází, neboť plošná hustota zářivého výkonu dosahuje v tmavé polovině roku v nevýrobních interiérech osvětlených jen rozptýleným světlem v oboru vlnových délek 390 až 270 nm až cca  $120 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Ve světlé části roku je to cca osmkrát až dvanáctkrát více (měření autorů – zatím nepublikováno).

Je zřejmé, že na základě našich poznatků i bez znalosti sorpčních izoterm, povrchové elektrické vodivosti a koeficientů propustnosti lze omezit nežádoucí TEE. Stačí k tomu dnes v nevýrobních interiérech běžně rozšířená dvojice přístrojů - teploměr a vlhkoměr a samozřejmě zařízení pro případnou úpravu vlhkosti v objemech příslušného interiéru. Teplotu rosného bodu lze z přístrojových údajů určit některým ze způsobů, které jsou uvedeny v manuálu přiloženém k přístrojům, popř. některým z grafických prostředků, které jsou popsány v [24].

Je možno konstatovat, že při rozdílu  $\Delta T_{RB} = 8^\circ\text{C}$  a méně jsou antistatická úprava podlahovin [17, 21] a avivážní ošetření textilií vcelku bezpředmětné. Uvedeného rozdílu lze běžně dosáhnout při relativních vlhkostech vzduchu v rozmezí 30 – 60 %, které jsou pro nevýrobní interiéry doporučovány jako optimální [6, 10].

## 5. ZÁVĚR

Na závěr je třeba zdůraznit, že údaje v předchozím textu platí pouze pro nevýrobní interiéry. Tyto interiéry jsou z hlediska TEE charakterizovány krátkodobým a přetržitým kontaktem triboelektricky aktivních látek (chůze po koberech a jiných podlahovinách, sezení na židlích a vstávání z nich, zametání a provoz vysavačů, manipulace se sypkými potravinami, manipulace se spisy v kancelářích, obsluha kancelářské techniky, atd.). Naopak, uvedené údaje neplatí tam, kde se TEE vyvíjí v rámci nějakých kontinuálních procesů (výtok kapalin, proudění par, řemenové převody a transportéry, operace s velkoplošnými textiliemi a dlouhými vlákny, popř. foliemi, atd.), tedy v interiérech výrobních. Tam je vhodné nadále aplikovat osvědčené prostředky jakými jsou především neutralizátory elektrického náboje různých principů a konstrukcí.

## LITERATURA

- [1] Artbauer J., Šedovič J., Adamec V.: Izolanty a izolácie, ALFA Bratislava, 1969.
- [2] Fexa J., Široký K.: Měření vlhkosti, SNTL Praha, 1983.
- [3] Guerret-Piecourt Ch., Bec S., Treheux D.: Electrical charges and tribology of insulating materials. C.R. Acad. Sci. Paris., 2001, t.2 Serie IV, 761-774
- [4] Heinecke G. et al.: Tribochemistry, Akademie-Verlag Berlin, 1984

- [5] Jindřich J.: Sondy pro měření elektrických polí, sborník konference „Statická elektřina 83“, Tábor 1983, 89 - 94
- [6] Jokl M.: Interní mikroklima, ventilační a klimatizační technika pro stavební inženýry I, skripta ČVUT FSv, Praha 1981
- [7] Kašpar I., Kutman O., Michalko O.: Měření fyzikálních veličin, skripta ČVUT FSv, Praha 1988
- [8] Kutílek M.: Vlhkost pórovitých materiálů, SNTL Praha, 1984
- [9] Lapčík L., Pelikán P., Čeppan M.: Fotochemické procesy, ALFA Bratislava, 1989
- [10] Mathausarová Z.: Vlhkost vzduchu v bytech, Domov 6 (2000), 98
- [11] Muhleisen R.: Atmosphärische Elektrizität, Handbuch der Physik, Band XL VIII, Springer-Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1957
- [12] Nähen Leicht Gemacht, Verlag Anne Burda, 1994
- [13] Ondrejko E.: Statická elektrina – všude okolo nás, sborník konference „Statická elektřina 83“, Tábor 1983, 5-10 [23] Špeňkov G. I.: Fizikochimija trenija, Izd. BGU Minsk, 1978
- [14] Pech J.: měření elektrostatických polí kulovými sondami, sborník konference „Statická elektřina 83“, Tábor 1983, 102 - 106
- [15] Petr J.: Struktura a vlastnosti materiálů II, skripta ČVUT FEL, 1986
- [16] Ponec V., Knor Z., Černý S.: Adsorpce na tuhých látkách, SNTL Praha, 1968
- [17] Prokop B.: PVC podlahoviny pro speciální aplikace, sborník konference „Statická elektřina 86“, Tábor 1986, 166 - 168
- [18] Spurný Z.: Atmosférická ionizace, Academia Praha, 1980.
- [19] Staněk Z., Aubrecht L., Koller J.: Elektrický náboj respiračních plynů, Lékař a technika 27(1996), 34-36
- [20] Staněk Z., Aubrecht L., Koller J.: Generace a měření elektricky nabitých částic v parní turbíně, připraveno k publikaci
- [21] Steiner L.: Elektrostaticky vodivé podlahy s plastovými podlahovinami, sborník konference „Statická elektřina 86“, Tábor 1986, 172 – 175
- [22] Šimorda J., Staroba J.: Statická elektřina v průmyslu, SNTL Praha, 1956
- [23] Špeňkov G.I.: Fizikochimija trenija, Izd. BGU Minsk, 1978
- [24] Uhlíř P.: Meteorologie a klimatologie v zemědělství, ČSAZV Praha, 1961.

## **BIOGRAPHY**

Zdeněk Staněk was born on 1937. In 1968 he graduated at the department of technology and material physics of the electrotechnical Faculty at CTU in Prague. He defended his PhD. in the field of Applied Physics in 1979, his Assoc. Prof. in 1998. He is working as a lecturer at the Department of Physics. His scientific research is focusing on plasma physics, electrical discharges and low energy ion processes.