

# TEORETICKÝ VÝPOČET ZDROJE VLHKOSTI V BAZÉNOVÝCH HALÁCH

## THEORETICAL CALCULATION SOURCES OF MOISTURE IN POOL HALLS

doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.; Ing. Petr Blasinski, Ph.D. <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno*

### ABSTRAKT

Příspěvek se zabývá teoretickými metodami výpočtu odparu z povrchu vodní hladiny v bazénových halách. Motivací pro porovnání různých přístupů k výpočtu je potřeba určení produkce vodní páry v objektech bazénových hal, krytých vodních ploch, wellness center apod. Tyto poznatky jsou dále využívány pro potřeby návrhu vzduchotechnických jednotek, které mají za úkol zajistit eliminaci vodních zisků v objektech. V úvodní části článek popisuje obecnou teorii mechanismu přenosu hmoty nad klidnou vodní hladinou a představuje současné metody pro výpočet přenosu hmoty.

**Klíčová slova:** *difuze vodní páry, výpočet odparu, bazénové haly*

### ABSTRACT

This paper deals with the theoretical methods of calculating evaporation from the surface of the water in pool halls. The motivation for comparing different approaches to the calculation is the determination of need for production of water vapor in the objects of pool halls, indoor water surfaces, wellness centers, etc. These findings are further used for the needs of design of air handling units, which are to provide the elimination of water gains in buildings. In the introductory part of the article is described the general theory of the mechanism of mass transfer over a calm water surface, and presents the current methods for the calculation of mass transfer.

**Key words:** *diffusion of water vapor, calculation of evaporation, swimming pools*

## 1 ÚVOD

Teoretický výpočet zdroje vlhkosti v bazénových halách se uplatní zejména při navrhování vzduchotechnických (VZT) zařízení obsluhující tyto prostory. Pro potřeby odvlhčování zajišťované VZT zařízením, je nutné zjistit hmotnostní toky odpařující se vody z vodních hladin otevřených bazénů. Odpařování zahrnuje přenos tepla i vlhkosti (hmoty), přičemž oba procesy současně ovlivňují termodynamický stav vzduchu nad těmito povrchy. Samotný článek se zabývá výpočtem odparu z povrchu vodní hladiny. V úvodní části je popsána obecná teorie mechanismu přenosu hmoty a tepla nad klidnou vodní hladinou a dále jsou představeny současné metody pro výpočet přenosu tepla a hmoty.

## 2 TEORIE

Přenos vlhkosti je jedním z druhů přenosových jevů, kde je přenášená látka součástí vzduchu - většinou vodní pára, obecně plynné příměsi. K přenosu dochází dvěma mechanismy, jsou to[1]:

- kmitáním částic – jedná se o náhodný pohyb molekul (difúze)

- objemový, makroskopický pohyb tekutiny – velké množství molekul se v kterémkoli okamžiku pohybuje kolektivně, ve velkých objemech (advekce)

Výsledkem superpozice těchto mechanismů dochází k přenosu látky vlivem konvekce. Výchozí pro řešení tohoto jevu je určení difúze vodní páry. Hustotu hmotnostního toku tekutin při jejich stacionární difúzi mezi místy s různou koncentrací (platí pro izotermní děje), případně různým parciálním tlakem (platí obecně) vyjadřuje Fickův zákon:

$$J_m = -D_C \cdot \frac{\partial c}{\partial n} = -D_D \cdot \frac{\partial p}{\partial n} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (1)$$

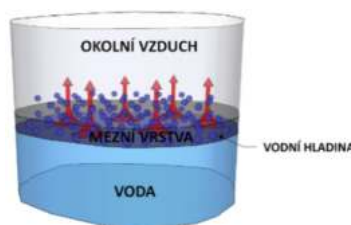
kde,  $c$  koncentrace difundující látky [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $n$  délka ve směru normály k izobarám nebo čarám s konkrétní koncentrací [m]  
 $D_C$  součinitel difúze vztahující se k rozdílu koncentrací [m<sup>2</sup>/s]  
 $D_D$  tlakový součinitel difúze vztahující se k rozdílu parciálních tlaků [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ]

Záměnou koncentrace difundující látky  $c$  za hustotu  $\rho$  ve stavové rovnici ideálního plynu a dosazením do vztahu Fickova zákona (1) platí  $D_C = r \cdot T \cdot D_D$ . Vzhledem k tomu, že hodnota  $D_C$  je pro vzduch i vodní páru shodná lze pro poměr  $D_D = r_v/r_p = 0,622$  určit vztah:

$$D_C = \frac{2,194}{p_b} \cdot \frac{T^{1,8}}{273^{1,8}} = 90,395 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{T^{1,8}}{p_b} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (2)$$

Fickův zákon platí pro oboustrannou difúzi, která však obvykle nenastává. Vodní pára může difundovat z vodní hladiny do vzduchu bez překážek, vzduch do vodní hladiny difundovat nemůže. Tj. molekuly vodní páry difundují z hladiny do vzduchu a současně i molekuly vzduchu difundují směrem k hladině. Molekuly vzduchu se však dostanou pouze na povrch nepřestupné hladiny, kde se shlukují a nasycují vodní párou a konvekčním pohybem se vracejí zpět [2]. Pohybem vodní páry se zvyšuje tok jejich molekul, které difundují ve vzduchu. Hmotnostní tok vodní páry je tak při jednostranné difúzi větší než při oboustranné. Korekce toku odpařující se vlhkosti se označuje jako Stefanova korekce na jednostrannou difúzi [3].

Přenos vlhkosti se děje ve většině případů difúzí vodní páry z vodní hladiny do vzduchu, ale jsou případy, kdy může docházet k opačnému případu difúze vodní páry. Směr hmotnostního toku páry určují jednotlivé psychrometrické a fyzikální veličiny vody a vzduchu.



Obr. 1: Znárodnění principu odpařování vody

### 3 VÝPOČET - POPIS POUŽÍÝCH METOD

Problematika přesného řešení odparu pomocí Fickova zákona je obtížná z několika důvodů. Prvním obtížným úkolem je vystihnout měnící se dynamické prostředí zkoumaného procesu, jak na straně vzduchu, tak na straně vody. Dalším faktorem, jenž je nutno ve výpočtech sledovat a řešit je vstup vnějších jevů a vlivů do výpočtu. Příkladem je případ plavců vířící a odstříkující vodu, jež je potřeba zohlednit při výpočtu odpařující se vody z bazénu. Obdobný problém charakterizují např. vířivky, jež dokáží pomoci trysek v bazénu odpar z vodní hladiny několikanásobně zvýšit.

Přechod od teoretického k praktickému řešení představuje využití metod, jež aplikují základní vztahy uvedené v teoretické části tohoto textu a tyto doplnit v potřebných částech vztahy zjištěné experimentálně nebo pomocí podobnostních metod. K těmto dílčím výpočtům přistupují s různou citlivostí na změnu okrajových podmínek, proto je vhodné jejich vzájemné porovnání a pozorování jejich vzájemných výsledků. Zásadním úkolem při praktickém výpočtu je určení součinitele přestupu hmoty v mezní vrstvě nad hladinou a také psychrometrické a energetické veličiny vzduchu a vody v různých vrstvách.

#### 3.1 Výpočet množství odpařené vody dle německé normy VDI 2089 (Technické vybavení budov plováren, kryté bazény)

##### 3.1.1 Výpočet dle VDI 2089 (starší vydání):

Množství odpařené vody se stanoví dle vztahu:

$$m_{wo} = \varepsilon \cdot S_h \cdot (p_{v(t_w)} - p_{v(t_i)}) \quad [\text{g} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

kde,  $\varepsilon$  součinitel přenosu hmoty, viz tab. 1 [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ]  
 $S_h$  plocha volné hladiny [ $\text{m}^2$ ]  
 $p_{v(t_w)}$  tlak syté páry při teplotě vzduchu rovné teplotě vody [Pa]  
 $p_{v(t_i)}$  tlak páry při teplotě vnitřního vzduchu [Pa]

Charakter provozu	$\varepsilon$ [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ]
Soukromý bazén	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Veřejný bazén	$7,8 \cdot 10^{-5}$
Bazén s umělými vlnami	$9,7 \cdot 10^{-5}$

Tab. 1: Součinitel přenosu hmoty pro bazény dle VDI 2089 (starší vydání)

##### 3.1.2 Výpočet dle VDI 2089 (nové vydání):

Množství odpařené vody se stanoví dle vztahu:

$$m_{wo} = \frac{\beta_{(p/n)}}{R_v \cdot \bar{T} \cdot 3,6} \cdot S_h \cdot (p_{v(t_w)} - p_{v(t_i)}) \quad [\text{g} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

kde,  $\beta$  součinitel přenosu hmoty, viz tab. 2 [m/h]  
 $R_v$  plynová konstanta pro vodní páru;  
 $R_v = 461,52 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$   
 $\bar{T}$  aritmetický průměr teploty vody a vzduchu [K]  
 $S_h$  plocha volné hladiny [ $\text{m}^2$ ]  
 $p_{v(t_w)}$  tlak syté páry při teplotě vzduchu rovné teplotě vody [Pa]  
 $p_{v(t_i)}$  tlak páry při teplotě vnitřního vzduchu [Pa]

Charakter provozu	nepoužívaný bazén n [m/h]	používaný bazén p [m/h]
Zakrytý bazén (odpar pouze z přetokového žlábků)	0,7	-
Soukromý bazén	7	21
Veřejný bazén (hloubka vody > 1,35 m)	7	28
Veřejný bazén (hloubka vody < 1,35 m)	7	40
Bazén s umělými vlnami	7	50

Tab. 2: Součinitel přenosu hmoty pro bazény dle VDI 2089 (nové vydání)

### 3.2 Zjednodušený výpočet odpařené vody využívající empirických závislostí [2]

Množství odpařené vody se stanoví dle vztahu:

$$m_p = \beta_x \cdot \Delta x \cdot S_h = \beta_x \cdot (x_h'' - x) \cdot S_h \quad [\text{g/s}] \quad (5)$$

kde,  $\beta_x$  součinitel přenosu vlhkosti vztahující se k rozdílu specifických vlhkostí nasyceného vzduchu těsně nad hladinou (při teplotě hladiny a vzduchu v okolí)  $[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$   
 $x_h''$  měrná vlhkost nasyceného vzduchu  $[\text{kg}/\text{kg}]$  v okolním vzduchu při teplotě  $t_h$   $[\text{°C}]$   
 $x$  měrná vlhkost  $[\text{kg}/\text{kg}]$  v okolním vzduchu při teplotě  $t_v$   $[\text{°C}]$   
 $S_h$  plocha vodní hladiny  $[\text{m}^2]$

Součinitel přenosu vlhkosti  $\beta_x$  zjistíme ze vztahů:

a) odpařování z klidné hladiny vyhříváné vody při rychlosti vzduchu nad hladinou

$w \leq 1$  m/s;

$$\beta_x = (8,33 + 3,89 \cdot w - 0,072 \cdot t_u) \quad [\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (6)$$

$w > 1$  m/s:

$$\beta_x = [6,94 + 5,83 \cdot w - 0,072 \cdot t_u - 9,72 \cdot x_u \cdot (w - 1)] \quad [\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (7)$$

kde  $t_u = (t_i + t_h)/2$

$$x_u = (x_i + x_h'')/2$$

b) odpařování ze zvlněné hladiny vyhříváné vody

$$\beta_x = (6,945 + 5,278 \cdot w) \cdot 10^{-3} \quad [\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (8)$$

kde,  $t_i, t_h$  teploty vnitř. vzduchu a vodní hladiny  $[\text{°C}]$

$x_i, x_h''$  měrná vlhkost vnitř. vzduchu a nasyceného vzduchu při teplotě  $t_h$   $[\text{kg}/\text{kg}]$

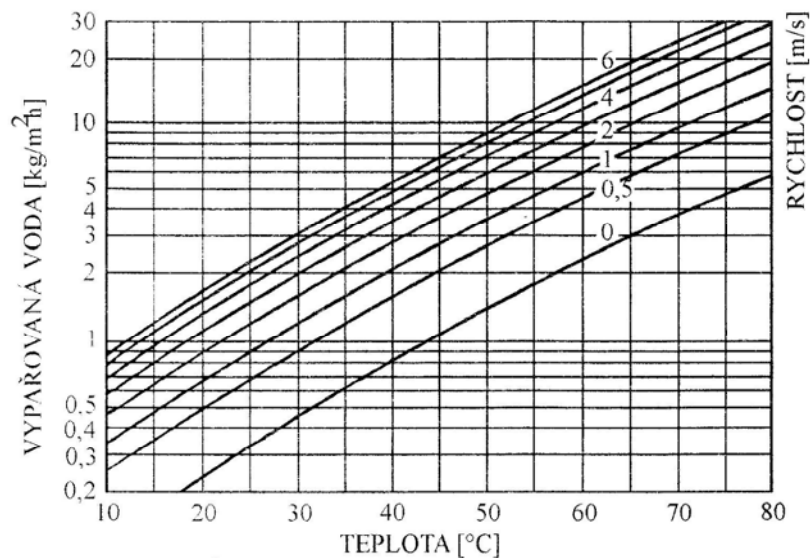
$w$  rychlost vzduchu nad hladinou  $[\text{m/s}]$

### 3.3 Odpařování z volné hladiny podle L. Oppla

Tok odpařované vody z volné hladiny průmyslových van nebo bazénů závisí silně na parciálních tlacích par na hladině a v okolním vzduchu a na rychlosti proudění vzduchu. I v klidném vzduchu bez nuceného větrání vzniká nad hladinou pohyb vyvolaný volnou konvekcí. Velmi proto záleží na představě o obrazech proudění v prostoru s vodní hladinou a na správném odhadu rychlosti pohybu vzduchu kolem hladiny. Podle L. Oppla je hustota toku odpařované vody [1]:

$$m_{wo} = (M_w - M_r) \cdot \frac{101,36}{p_b \cdot 3,6} \cdot S_h \quad [\text{g} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

kde, hodnoty  $M$  při teplotě vody (nikoliv povrchu) a při teplotě rosného bodu okolního vzduchu lze odečíst z grafu v obr. 2. Barometrický tlak  $p_b$  je v kPa.



Obr. 2: Tok vypařované vody podle L. Oppla

## 4 VÝSLEDKY

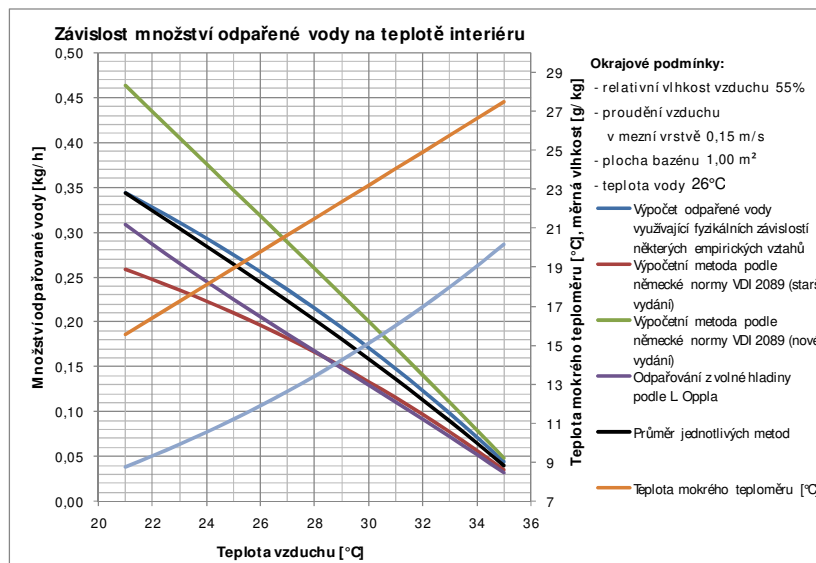
Byl zjišťována změna výsledných průběhů odparu na chování sledované soustavy, při měnících se vybraných parametrech výpočtu. V případě transferu vlhkosti v bazénové hale jsou zajímavé závislosti:

- množství odpařené vody na teplotě interiéru
- množství odpařené vody na relativní vlhkosti vzduchu v interiéru

Zkoumání závislostí představuje jednoduchou citlivostní analýzu, která umožňuje dobře porozumět sledovaným jevům. Ve výpočtu byly zahrnuty i postupy pro určení hmotnostního toku pomocí různých metod.

### 4.1 Závislost množství opárené vody na teplotě interiéru

Pro modelování závislosti odparu na teplotě interiéru byly zvoleny okrajové podmínky tak, aby vyhovovaly fyziologickému vnímání tepelně vlhkostní mikroklíma člověkem v uzavřeném prostoru (teplý, bez dusna). Jako relativní vlhkost interiéru byla zvolena vlhkost 55 %, proudění vzduchu nad hladinou 0,15 m/s. Jedná se o rychlost vzduchu, která vzniká při pohybu plavající osoby. Teplota vody byla zvolena 26 °C. Výsledky jsou zobrazeny v grafu na obr. 3.

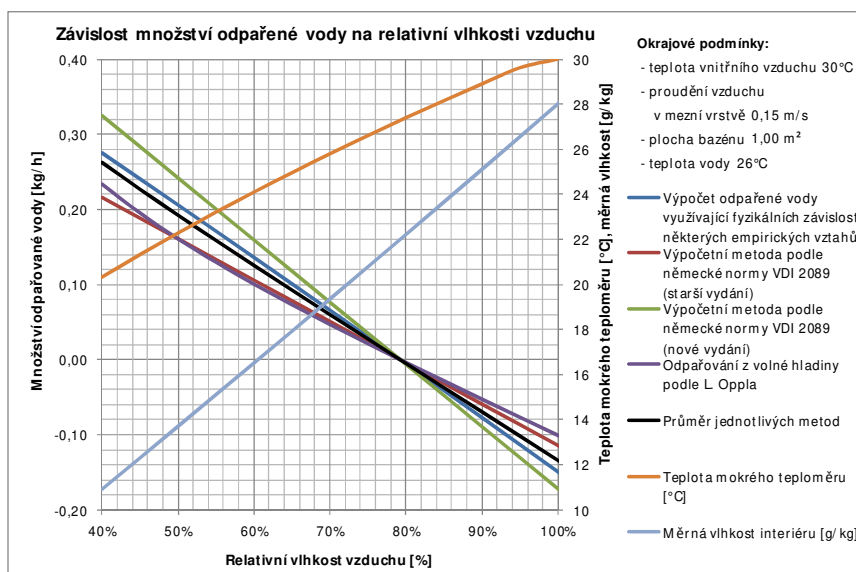


Obr. 3: Graf závislosti množství odpařené vody na teplotě interiéru

Z grafu je patrný menší odpar při vyšších teplotách vzduchu, kdy je teplota mokrého teploměru a měrná vlhkost již natolik vysoká, že difúze vodní páry neprobíhá tak intenzivně, jak při nižších teplotách, kdy je vzduch interiéru sušší a pojme větší množství vodní páry. Za předpokladu udržování konstantní relativní vlhkosti je tedy účelné volit vyšší teplotu vzduchu, neboť s rostoucí teplotou se snižuje množství odpařené vody a tím nároky na odvlhčování.

#### 4.2 Závislost odpařené vody na relativní vlhkosti vzduchu v interiéru

V tomto případě byly zvoleny okrajové podmínky tak, aby byla patrná i možná obrácená difúze vodní páry. Teplota bazénové vody byla zvolena jako nejčastěji používaná v praxi u menších rodinných bazénů, tj. 26 °C, proudění vzduchu nad hladinou 0,15 m/s. Výsledky jsou zobrazeny v grafu na obr. 4.



Obr. 4: Graf závislosti množství odpařené vody na relativní vlhkosti vzduchu v interiéru

Z grafu je patrný bod, kdy začíná docházet k obrácené difúzi vodní páry. Při zadaných podmínkách se jedná o stav vzduchu 30°C / 80%. Při relativní vlhkosti vyšší jak 80% již nedochází k odparu vody z bazénu, ale ke kondenzaci vodní páry v mezní vrstvě u hladiny bazénu.

Výsledným řešením je pak technická aplikace výsledků ve formě strojního zařízení, tzv. bazénové vzduchotechnické jednotky. Jedná se o velmi specifické technické zařízení, které nejen svým konstrukčním řešením, ale i specifickými úpravami vzduchu v závislosti na okrajových podmínkách exteriéru a interiéru, tvořící nestandardní komplexní řešení (např. chladicí okruh tepelného čerpadla až se třemi kondenzátory apod.). Ukázka aplikovaného technického řešení je na obr. 5.



Obr. 5: Ukázka aplikovaného technického řešení, tzv. bazénová jednotka druhé generace

## 5 ZÁVĚR

Článek poukazuje na složitost fyzikálního problému zkoumajícího výpočet odparu z vodní hladiny a uvádí ukázky výpočtů odparu pomocí praktických výpočtových vztahů pro vybrané okrajové podmínky. Z jednotlivých grafů jsou zřejmé závislosti odparu na jednotlivých fyzikálních a psychrometrických veličinách. Výstupy z grafů pak naznačují, že výběr metody výpočtu odparu má výrazný vliv na to, zda ve výsledku dojde k poddimenzování nebo předimenzování vzduchotechnického zařízení. Například, přestože norma VDI 2089 ve svém novějším vydání nabízí nejvíce možností, jak přizpůsobit výpočet zadaným okrajovým podmínkám, v porovnání s ostatními metodami vykazuje pro navrženou situaci nejvyšší hodnoty odparu. Zatímco hodnotám blízcím se průměru všech metod se nejvíce podobají výstupy metody výpočtu fyzikální závislosti některých empirických vztahů. Pochopením dějů probíhajících při odparu vody z hladiny a vhodnou volbou okrajových podmínek je pak možné zajistit optimální postup při zpracování technických návrhů daných vzduchotechnických zařízení obsluhující tyto prostory. Technický a energetický návrh bazénové jednotky jsou přímo závislé na zvolené metodě výpočtu.

Tento článek vznikl za podpory projektu specifického výzkumu FAST-S-15-2620.

**Použitá literatura**

- [1] Hemzal, K. Přenosové jevy v technice prostředí. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 100 s. ISBN 978-800-1029-244.
- [2] Székyová, M., Ferstl, K. a Nový, R.. Větrání a klimatizace. 1. české vyd. Bratislava: JAGA, 2006. 359 s. ISBN 80-8076-037-3
- [3] Jícha, M. Přenos tepla a látky. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [4] Rubina, A.; Tesař, Z.; Blasinski, P., Modelování fyzikálních jevů 1 - Odpar z vodní hladiny, článek v TZBinfo , ISSN 1801-4399, Topinfo s.r.o., Praha, 2011
- [5] VDI 2089. Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung. Berlin: Issue German, 2010.
- [6] TERUNA, Technika budov, s.r.o. [počítačový program]. Ver. 1.5b. [cit. 2012-02-22]. Dostupný z: <http://www.technikabudov.cz/ASP/Downloads/setup.zip>