



Ing. Michal PRŮDEK,
doc. Ing. Jiří BAŠTA, Ph.D.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Použití regulovatelných ejektorů

Controllable Ejector Use

Recenzent
doc. Ing. Karel Brož, CSc.

Autoři rozebírají možnosti použití regulovatelných ejektorů pro oblast vytápění. Seznamují čtenáře s metodikou návrhu regulovatelných ejektorů jak po stránce teoretické, tak po stránce praktického použití vytvořeného návrhového programu.

Klíčová slova: vytápění, regulovatelný ejektor

The authors analyze the possibilities of the controllable ejector use for heating sphere. They acquaint the readers with methodology of controllable ejector design both in the theoretical respect and in the practical use respect of the created design program.

Key words: heating, controllable ejector

Ejektory byly svého času hojně používány. S rostoucími nároky na přesnou a úspornou regulaci výkonu otopných soustav se od nich začalo upouštět. Nové regulovatelné ejektory s regulační jehlou však výše uvedené požadavky splňují za podmínky, že jsou správně navrženy a jsou použity pouze tam, kde jsou splněny okrajové podmínky jejich efektivního použití.

Ejektor využívá změny tlakové energie na kinetickou energii v trysce – dýze (obr. 1). Snížením tlaku ve vstupní komoře na hodnotu p_{min} se dosáhne sacího účinku, který umožní proudění přisávaného množství M_2 hnané látky do vstupní komory. Sdílením hybnosti primárního a sekundárního proudu ve směšovací komoře a částečně již ve vstupní komoře se dosáhne vyrovnání rychlosti proudu na hodnotu w'_3 ve výstupním průřezu směšovací komory. V difuzoru potom roste tlak vystupujícího proudu vlivem změny kinetické energie zpět na tlakovou (Bernoulliho rovnice) s určitými ztrátami až na výstupní hodnotu p_3 .

V dalším se zabýváme pouze vodními ejektory, konstruovanými pro potřeby vytápění. Slouží k připojení otopných soustav na primární horkovodní či teplovodní síť u centralizovaného zásobování teplem. Je to jeden z tzv. tlakově závislých principů zapojení, protože tlakové poměry před i za ejektorem se vzájemně ovlivňují. Schéma takového připojení ukazuje obr. 2.

Na obr. 2. jsou uvedeny základní přetlaky a označování jednotlivých veličin vstupujících a vystupujících z ejektoru. V dalším textu bude používáno označování podle tohoto schématu.

Přetlaky v primární síti a spotřebitelské soustavě:

– přetlak v místě připojení primární sítě

$$\Delta p^* = p_1 - p_2,$$

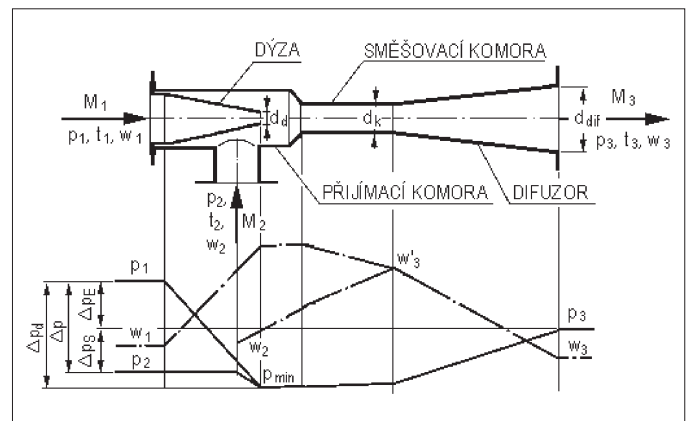
– tlaková ztráta spotřebitelské soustavy:

$$\Delta p^*_s = p_3 - p_2$$

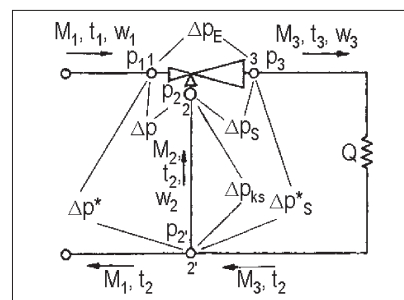
Mezi body 1 a 2 je rozdíl tlaků Δp , mezi body 2 a 3 je Δp_s . Přetlaky Δp^* a Δp^*_s se liší o tlakové ztráty v úseku potrubí 2 a 2'. Na obr. 2. jsou označeny jako Δp_{ks} . Vzhledem k tomu, že úsek je velmi krátký, při srovnatelném průměru jakou má zbytek potrubí, lze tuto tlakovou ztrátu zanedbat a považovat $\Delta p \doteq \Delta p^*$ a $\Delta p_s \doteq \Delta p^*_s$. Tak také budou uvažovány v dalším textu.

Rozdíl absolutních tlaků před a za ejektorem představuje tlakovou ztrátu hnané tekutiny v ejektoru

$$\Delta p_E = p_1 - p_3 = \Delta p - \Delta p_s.$$



Obr. 1 Hlavní části ejektoru a přibližný průběh rychlostí a tlaků



Obr. 2 Tlakově závislé připojení otopné spotřebitelské soustavy na tepelnou síť přes ejektor

Dále budeme využívat tři bezrozměrná kritéria, která velmi zjednoduší znázorňování jednotlivých závislostí.

Prvním z nich je **tlakový poměr Π** , definovaný jako

$$\Pi = \frac{\Delta p_s}{\Delta p}.$$

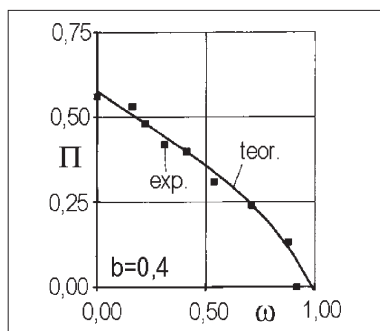
Směšovací poměr ω je poměr přisávaného množství hnané tekutiny M_2 k množství hnané tekutiny M_1

$$\omega = \frac{M_2}{M_1}.$$

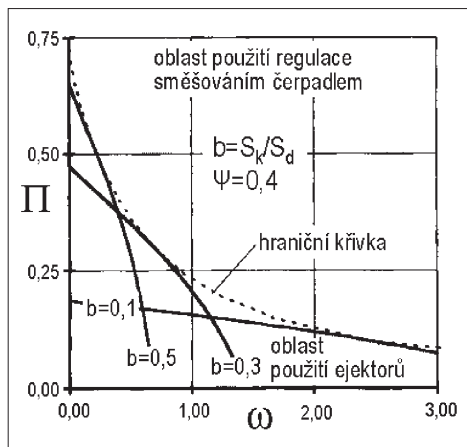
Z tepelné bilance ejektoru lze vyjádřit závislost směšovacího poměru pouze na teplotách takto

– tepelný výkon předávaný z primární sítě

$$Q = M_1 c (t_1 - t_2). \quad (1)$$



Obr. 3
Závislost $\Pi = f(\omega)$
při $b = 0,4$ a $\psi = 0,4$



Obr. 4
Soustava křivek
 $\Pi = f(\omega)$ pro konkrétní
konstrukční řešení
ejektoru

– tentýž výkon se přenáší do otopné soustavy
 $Q = M_3 c (t_3 - t_2)$.

Podělením rovnic (1) a (2) dostaneme

$$\frac{M_3}{M_1} = \frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_2}$$

Vycházejme z rovnosti $M_3 = M_1 + M_2$, získáme po úpravě vztah

$$\omega = \frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_2}$$

Je důležité si uvědomit, co tento vztah znamená. Znamená, že směšovací poměr je tím vyšší, čím vyšší je rozdíl mezi teplotou vody v přívodním potrubí primární sítě t_1 a teplotou vody v přívodním potrubí otopné soustavy (či obecně odběratelského okruhu) t_3 . Jak uvidíme v následujícím, s vyšším směšovacím poměrem rostou nároky na přetlak v místě připojení primární sítě.

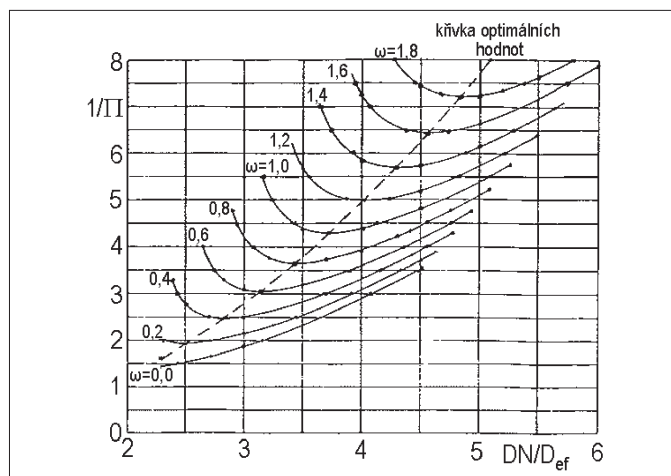
Dalším důležitým bezrozměrným kritériem je **poměr průřezů směšovací komory a dížy b** :

$$b = \frac{S_k}{S_d} = \left(\frac{d_k}{d_d}\right)^2$$

OBLAST POUŽITÍ EJEKTORŮ

Na základě fyzikálních zákonů lze vyjádřit teoretickou závislost mezi směšovacím poměrem, tlakovým poměrem a poměrem průřezů jako

$$\Pi = \frac{2 \cdot b + \left(\frac{\omega b}{1-b}\right)^2 (1-2b) - b^2 \cdot (1+\omega)^2 \cdot (1+\Psi)}{1 - \left(\frac{\omega b}{1-b}\right)} \quad (3)$$



Obr. 5 Návrhový diagram konkrétního ejektoru s vyznačenou křivkou optimálních hodnot

kde součinitel ψ vyjádřený vztahem

$$\Psi = \left(\lambda \cdot l_k / d_k\right) + \left[1 - \left(\frac{S_k}{S_{dif}}\right)^2\right] \cdot (1 - \eta_{dif}),$$

je ztrátový součinitel. Ten v sobě zahrnuje třecí ztráty ve směšovací komoře a ztráty při přeměně kinetické energie na tlakovou energii v difuzoru.

S_{dif} je plocha výstupního otvoru difuzoru,

η_{dif} účinnost difuzoru.

- (2) Výsledkem rovnice je, pro geometrický poměr $b = 0,4$ a ztrátový součinitel $\psi = 0,4$, křivka znázorněná v obr. 3. Zde je vidět, že tato teoretická závislost dobře odpovídá experimentálně zjištěným hodnotám.

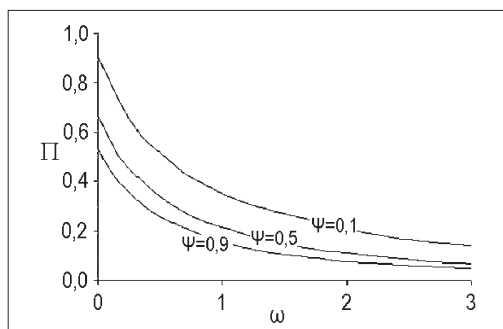
Výslednou soustavu křivek zobrazuje obr. 4. Pod hraniční křivkou je zde vyznačena oblast vhodná pro užití ejektoru, nad ní je oblast vhodná pro použití jiného typu regulace např. směšováním s čerpadlem v odběratelském okruhu. Hraniční křivka tak jednoznačně vymezuje oblast použití ejektoru.

Změnou souřadnic a vztahem k návrhovým rozměrům DN a D_{ef} lze z této soustavy křivek vytvořit návrhový diagram (obr. 5), kde DN je jmenovitá připojovací světlost a $D_{ef} = 17,58 \sqrt{\frac{M_1}{s p_{min}}}$.

Soustavou křivek vzniklý diagram (obr. 4) má řadu významů. Zejména ho lze velmi jednoduše použít pro prvotní odhad, zda v daném případě tento ejektor použít lze či nikoliv. Stačí vyjádřit směšovací a tlakový poměr a pokud je jejich průsečík nad mezní křivkou nelze ejektor použít, pokud je pod ní je naopak vhodné použít ejektor.

Pro výše uvedené zjištění je nutné znát ztrátový součinitel ψ daného typu ejektoru. Změna mezní křivky v závislosti na změně ψ je vyobrazena na obr. 6. Je zřejmé, že s rostoucím ztrátovým součinitelem dochází k posunu mezní křivky směrem dolů, a tedy ke zmenšení oblasti, v níž lze daný ejektor užít. Vyráběné regulovatelné ejektory mají ztrátový součinitel v rozmezí 0,3 až 0,6. Pro základní odhad použitelnosti ejektoru při daných vstupních podmínkách tedy lze použít diagram na obr. 6.

Z tohoto diagramu lze vyčíst několik dalších důležitých pravidel. Se zvětšujícím se směšovacím poměrem klesá tlakový poměr, a je tedy pro stejné tlakové ztráty odběratelského okruhu potřebný vyšší přetlak v primární sítě. Připomeňme si závislost velikosti směšovacího poměru ω na teplotách. Snadno pak dojdeme k závěru, že se zvyšujícím se rozdílem teplot t_1 a t_3 roste nutný



Obr. 6
Změna mezní křivky
v závislosti na ψ

přetlak v primární síti. Naopak při malém teplotním rozdílu potřebujeme nižší přetlak. Pro základní představu, při směšovací poměru $\omega = 3$ klesá tlakový poměr reálných ejektorů k hodnotám blízkým 0,12 a potřebný přetlak na primární síti je přibližně na úrovni 8 násobku tlakových ztrát spotřebitelského okruhu. Naopak při $\omega = 0,1$ lze ejektor provozovat již při přetlaku rovnajícím se 1,5 násobku tlakových ztrát spotřebitelské sítě.

Pokud máme k dispozici přetlak na primární síti vyšší pouze o 25 % a méně než jsou ztráty v odběratelském okruhu, nemá smysl uvažovat o použití ejektoru.

Obdobu diagramu na obr. 4 je použita v návrhovém programu pro rychlé předběžné znázornění použitelnosti ejektoru pro dané zadání.

Mezní křivka byla pro možnost výpočtu proložena polynomem 6. stupně. Ejektor, který by měl svůj pracovní bod právě na mezní křivce, by při daném směšovacím poměru potřeboval minimální přetlak na primární straně pro pokrytí tlakových ztrát odběratelského okruhu. Řečeno jinak, ejektor by při daném přetlaku primární sítě dokázal pokrýt největší tlakové ztráty odběratelské soustavy. Tomuto stavu odpovídá v návrhovém diagramu křivka optimálních hodnot (obr. 5).

V návrhovém diagramu (obr. 5) si lze všimnout, že křivky pro jednotlivé směšovací poměry jsou vykresleny pouze v určitém rozsahu. Ten přibližně odpovídá rozsahu vyráběných jmenovitých průměrů a jejich kombinací s vyráběnými průměry dýz.

Obecně je vždy nutný dostatečný dispoziční rozdíl tlaků v místě připojení ejektoru na primární síť. Je potřeba tím vyšší dispoziční rozdíl tlaků, čím vyšší je směšovací poměr a tlakové ztráty připojovaného odběratelského okruhu. Směšovací poměr je tím vyšší, čím vyšší je rozdíl teploty vody v přívodním potrubí primární sítě t_1 a teploty v přívodním potrubí odběratelské soustavy t_3 .

NÁVRHOVÝ PROGRAM

Byl vytvořen návrhový program pro regulovatelné ejektory. Zpracovaný návrhový program má za cíl maximálně zjednodušit návrh regulovaných vodních ejektorů a event. tak napomoci jejich rozšíření. S ohledem na dostupnost projekčních podkladů je navržen pro ejektory vyráběné pouze jednou firmou.

V části textu o oblasti použití ejektorů bylo použito obecné označení některých veličin. Reálný ejektor je navrhován pro konkrétní praktické podmínky a těm odpovídá i pozměněné označení některých veličin

Nejnepříznivější stav pro provoz ejektoru nastane, pokud bude tlakový rozdíl primární sítě minimální Δp_{\min} (namísto Δp) a zároveň tlaková ztráta spotřebitelské soustavy maximální Δp_{\max} (namísto Δp_s).

V některých výpočtech je také použita předběžná nepovinná hodnota tlakových rozdílů. Tyto jsou označeny čárkou. Předběžný tlakový rozdíl na

primární straně je tedy $\Delta p'_{\min}$ a předběžná tlaková ztráta odběratelského okruhu je $\Delta p'_{\max}$.

Z principu návrhu ejektoru pro nejnepříznivější podmínky vyplývá nutnost zadat požadovaný tepelný výkon a jednotlivé teploty. Zadávání se realizuje pro nejnižší teploty, pro které je nastavena ekvitermní regulace. Tyto teploty v programu odlišně neznačíme.

Postup návrhu se liší podle typu zadání. Zadání je rozděleno do tří základních variant. Liší se zejména tím, zda je pevně určena hodnota Δp_{\min} a Δp_{\max} či nikoliv.

V prvním případě jsou obě hodnoty pevně dány a nelze je měnit. Může jít například o rekonstrukci stávajícího zařízení, kdy se zvažuje možnost nahrazení stávajícího zařízení se směšováním a oběhovým čerpadlem regulovatelným ejektorem.

Ve druhém případě máme pevně určenu pouze hodnotu Δp_{\min} , hodnotu Δp_{\max} je možno měnit. Příkladem může být návrh nového zařízení připojovaného k již existující přípojce primární sítě. V tomto případě je ejektor navržen tak, aby z dané hodnoty Δp_{\min} dokázal pokrýt co největší Δp_{\max} .

Poslední, třetí možnost je případ, kdy je pevně určena pouze hodnota Δp_{\max} a hodnotu Δp_{\min} je možno měnit. Může jít o projektování primární sítě k již navrženým zařízením, např. průmyslovým technologiím. Zde je ejektor navrhován tak, aby mu k pokrytí tlakových ztrát spotřebitelské soustavy Δp_{\max} stačil co nejmenší přetlak v místě připojení na primární síť Δp_{\min} .

Všechny tři možnosti přístupu k návrhu v sobě zahrnuje návrhový program, kde výběr varianty zadání je zpracován formou uživatelského dialogu (obr. 7).

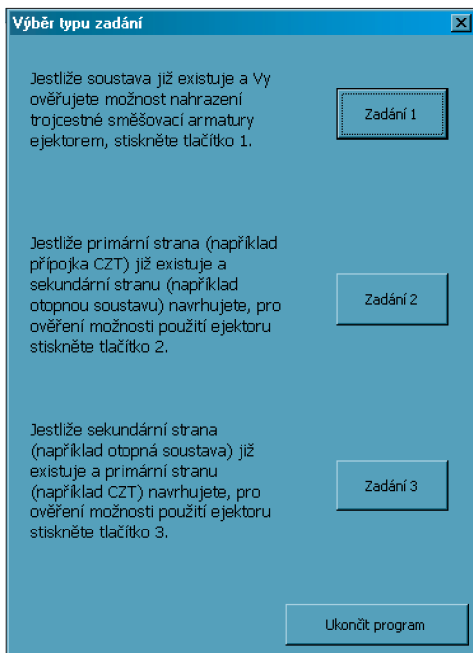
V návrhovém rozhraní (obr. 8) pak uživatel zadá veškerá pro návrh potřebná data. Již při zadávání je prováděna kontrola, zda je teplota t_1 v rozsahu, ve kterém mohou ejektory pracovat. Hodnoty tlaků a přetlaků lze zadávat v jednotkách Pa, kPa, MPa, bar, mbar a mm vodního sloupce. Podobně lze požadovaný tepelný výkon zadávat ve W, kW, MW a GW. Na schématu zapojení ejektoru nejsou zobrazeny žádné pomocné armatury, měřidla apod. s výjimkou regulátoru tlakové difference a ejektoru. Účelem tohoto zjednodušení je připomenutí, že je vhodné ejektor opatřit ochranou proti kolísání tlaku v primární síti. Po spuštění programu provede veškeré vnitřní přepočty. Nejdříve vypočítá hodnotu směšovacího poměru ω a tlakového poměru Π , a zakreslí polohu bodu o těchto souřadnicích do diagramu (žlutý bod v diagramu vpravo dole – obr. 8.). Podle toho, zda je vypočtený bod nad nebo pod hraniční křivkou, je zobrazen předběžný komentář, zda je, či není vhodné použít ejektor.

Dalším důležitým výpočtem, který se provede po zmáčknutí tlačítka vypočítat je kavitační kontrola. Program spočítá, zda by v ejektoru při takto zadaných datech došlo ke kavitaci či nikoliv. Výsledek je opět ohlášen, a v případě, že by ke kavitaci došlo, je zobrazeno informační okno (obr. 9), ve kterém je mimo jiné uvedena minimální hodnota absolutního tlaku v místě připojení přívodu primární strany, při kterém ke kavitaci nedojde.

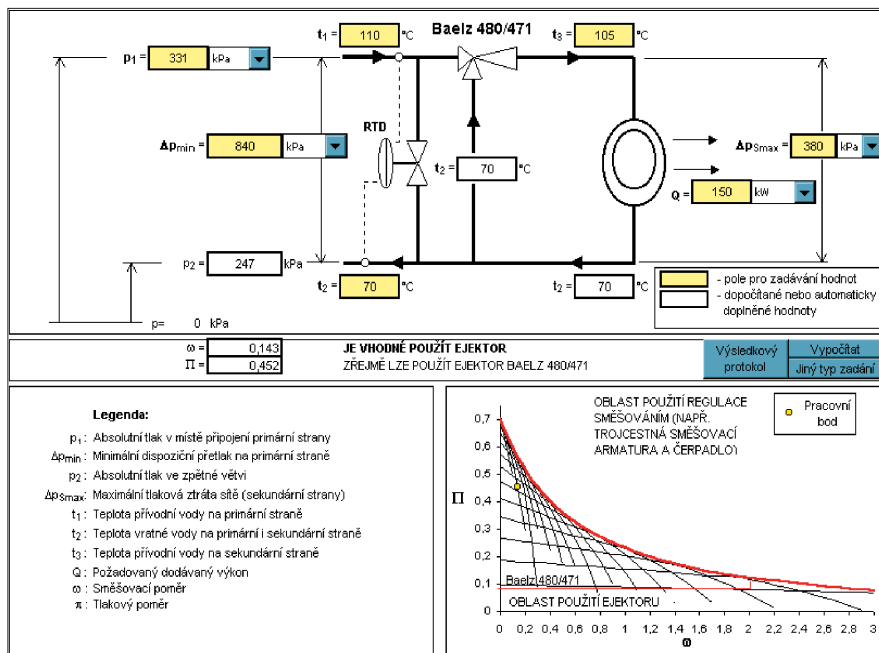
Po stisknutí tlačítka výsledkový protokol se pohled přepne na list odpovídající výsledkům pro daný typ zadání (obr. 10). V něm jsou uvedeny veškeré programem určené hodnoty týkající se ejektoru i připojených sítí.

Pro objednání ejektoru je třeba objednávku doplnit o hodnotu PN a provedení pohonu. Lze vytisknout celý výsledkový protokol, kam se doplní údaje o projektantovi a akci.

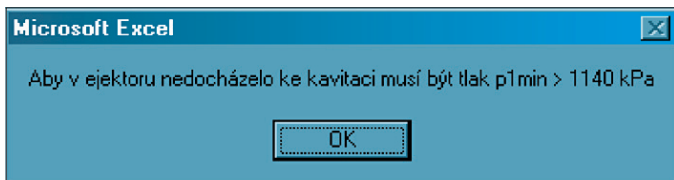
Vedle kvalitního návrhu ejektoru a jeho použití tehdy, kdy to kombinace směšovacího a tlakového poměru umožňuje, je třeba zajistit jeho správnou funkci v soustavě. Proti kolísání vstupních tlaků (a jejich přenosu do



Obr. 7 Uživatelský dialog pro výběr typu zadání



Obr. 8 Uživatelské rozhraní vstupních dat pro výpočet ejektoru – první typ zadání



Obr. 9 Informační okno kavitace v ejektoru

Akce:

Projektant:

Zadaná data:

Q = 180 kW
 $t_1 = 110$ °C
 $t_2 = 70$ °C
 $t_3 = 95$ °C
 $\Delta p_{min} = 85$ kPa
 $p_1 = 331,1$ kPa
 $\Delta p_{smax} = 20$ kPa

Výsledky:

JE VHODNĚ POUŽÍT EJEKTOR
 LZE POUŽÍT EJEKTOR BAE LZ 480
 LZE POUŽÍT EJEKTOR BAE LZ 471

Ejektor:

typ:	480 - připojení přírubami	471 - připojení závitové
DN =	40	40
$d_a =$	12,5 mm	12 mm

K objednávce je třeba připojit požadované provedení pohonu a PN. [Možné PN a provedení pohonu](#)

Sít:

$M_1 = 3,870$ m³/hod - objemový průtok hnací kapaliny
 $M_3 = 6,192$ m³/hod - objemový průtok odběratelskou soustavou

Typ Baelz 480
 $\Delta p_{smax} = 26,7$ kPa - skutečná hodnota přetlaku, který je ejektor schopen dodat při D_{min} .

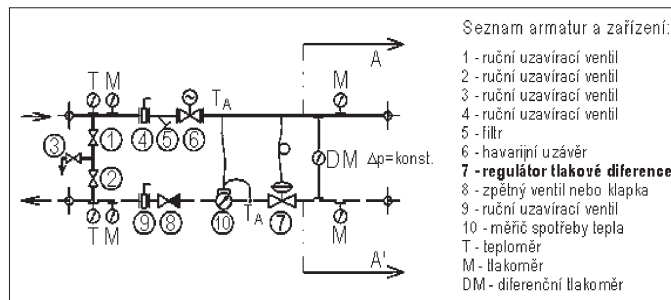
Typ Baelz 471
 $\Delta p_{smax} = 24,3$ kPa - skutečná hodnota přetlaku, který je ejektor schopen dodat při D_{min} .

[Návrat do zadání](#) [Tisk](#) [Nové zadání](#)

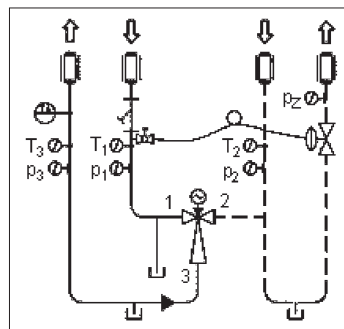
Obr. 10 Výsledkový protokol pro druhý typ zadání

spotřebitelské sítě) je třeba ejektory chránit. Optimální variantou je použití regulátoru tlakové difference (obr. 11 a 12).

Příprava teplé vody má jiné požadavky na regulaci než má otopná soustava. Proto je potřeba oddělit ejektor pro regulaci přípravy TV od ejektoru



Obr. 11 Regulátor tlakové difference na vstupu do objektu



Obr. 12 Regulátor tlakové difference u samostatného ejektoru

pro regulaci výkonu otopné soustavy. Lze například použít zapojení podle obr. 13.

SHRNUTÍ VÝHOD A NEVÝHOD REGULOVANÝCH EJEKTORŮ

Hlavní výhodou regulovatelných (regulovaných) ejektorů je bezesporu úspora energie díky vypuštění čerpadla z odběratelské sítě.

Ejektory mají pouze jednu pohyblivou součást, kterou je regulační jehla. Z toho vyplývá také větší spolehlivost, menší nároky na údržbu a delší životnost ejektorů.

Oproti výměníkům tepla (tlakově nezávislým připojením) představují ejektory značnou úsporu kovů, zvyšují přenosovou schopnost tepelné sítě asi o 10 %, nekladou zvýšené nároky na obestavěný prostor.

