

**inż. Magdalena Przydatek**

## **Analiza wpływu kształtu stożkowej części prądownicy na jej właściwości hydrauliczne**

### **Abstrakt**

W skład hydrantu wewnętrznego wchodzi: wąż, zawór odcinający oraz prądownica. O charakterze swobodnego strumienia wody decyduje kształt (profil) nasadki z przewodu zasilającego.

Celem artykułu jest analiza wpływu kształtu stożkowej części prądownicy, poprzedzającej pyszczek, na jej właściwości hydrauliczne obejmujące prędkość i przyspieszenie strumienia na kierunku przepływu, a także straty ciśnienia wywołane oporami tarcia. W rozważaniach przyjęto trzy rodzaje tworzącej części stożkowej: w postaci linii wklęsłej, prostej (stożek) oraz wypukłej.

Zwrócono także uwagę na oddziaływanie kształtu stożkowego na kontrakcję wewnętrzną strumienia we wstawce uspokajającej (pyszczku), co ma istotny wpływ na zwartość strumienia wypływającego z prądownicy.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz stwierdzono, że prądownica o wypukłej tworzącej jest najkorzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia minimalizacji oporów tarcia, zaś wpływ stosowanych długości pyszczka ma drugorzędne znaczenie. Z praktycznego punktu widzenia, pewnym wyzwaniem przy wymiarowaniu części zbieżnej prądownicy pozostaje dobór krzywizny wypukłości, co wiąże się z przyjęciem wartości wykładnika funkcji krzywizny  $c > 1$ .

**Słowa kluczowe:** instalacja wodociągowa przeciwpożarowa, prądownica, straty ciśnienia, warunki przepływu, strumień wody

## Analysis of the Shape of the Conoidal Part of the Fire-hose Nozzle on its Hydraulic Properties

### Abstract

A typical hydrant installation includes a hose, a shut-off valve and a nozzle. The construction of a fire-hose nozzle determines the character of free water stream.

The aim of the article is to analyse the impact of the shape of conoidal part of the fire-hose nozzle on its hydraulic properties, including: speed and acceleration of stream in the flow direction, as well as the pressure losses due to the frictional resistance. Three types of the conoidal part of the fire-hose nozzle: in the form of a concave, straight and convex line, were taken in the considerations.

Attention was also paid to the flow conditions, in the cylindrical outlet section (fire extinguisher nozzle) which has a significant impact on the content of the stream flowing out of the fire-hose nozzle.

Based on the calculations and analyses carried out, it was found out that the convex fire-hose nozzle is the most favourable solution from the point of view of minimizing the frictional resistance. The impact of the length of fire extinguisher nozzle on the pressure losses is of the secondary importance. From the practical point of view, a certain challenge when dimensioning the conical part of the fire-hose nozzle remains the selection of curvature, which is related to the value of the exponent  $c > 1$ .

**Keywords:** plumbing water supply installation, fire-hose nozzle, pressure losses, flow conditions, stream of water

### Wstęp

W technice pożarowej o charakterze stacjonarnym do dostarczenia wody w miejsce pożaru wykorzystuje się hydranty wewnętrzne i zewnętrzne. W skład typowej instalacji wodociągowej przeciwpożarowej wchodzi: wąż zasilający oraz prądownica wraz z zaworem odcinającym. Prądownica, znajdująca się na zakończeniu węża, jest stosowana do ukierunkowania, jak również do sterowania wypływem strumienia wody. Ze względu na dużą oporność hydrauliczną, prądownica jest elementem decydującym o przepustowości hydrantu. Podstawowe wymagania dotyczące instalacji hydrantowych zawarte są w polskich normach [PN-EN 671-1:2012, PN-EN 671-2:2012, PN-EN 671-3:2009, PN-B-02865:1997] [3].

**Tabela 1. Minimalne natężenia przepływu dla H52 według PN-EN 671-2:2012**

Średnica dyszy lub równoważna	Minimalne natężenie przepływu Q dla p = 0,4 MPa		Prędkość wylotowa
	[mm]	[dm <sup>3</sup> /min]	
9	92	1,533·10 <sup>-3</sup>	24,10
10	110	1,833·10 <sup>-3</sup>	23,98
11	136	2,267·10 <sup>-3</sup>	23,85
12	144	2,400·10 <sup>-3</sup>	21,22
13	170	2,833·10 <sup>-3</sup>	21,34

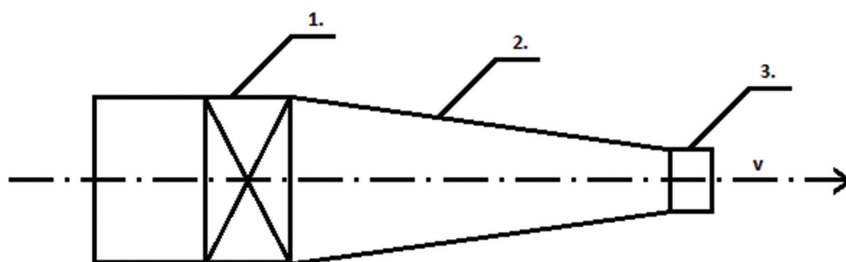
Źródło: [5]

Należy zauważyć, że w normach nie określono w sposób jednoznaczny wymagań dotyczących doboru prądownicy do węża w zależności od jego średnicy.

Projektując konstrukcję prądownicy, ważne jest właściwe wyprofilowanie dyszy wylotowej oraz wstawki uspakajającej przepływ (pyszcza). W rozwiązaniach należy dążyć do tego, aby straty ciśnienia były jak najmniejsze, a kontrakcja strumienia wypływającego ze wstawki uspakajającej, definiowana jako stosunek pola przekroju poprzecznego strumienia do pola przekroju pyszcza, była bliska jedności. Zjawisko kontrakcji działa niekorzystnie na akcję gaśniczą, powodując zaburzenie zwartości strumienia, gdyż nie zapewnia równoległości wypływających strug.

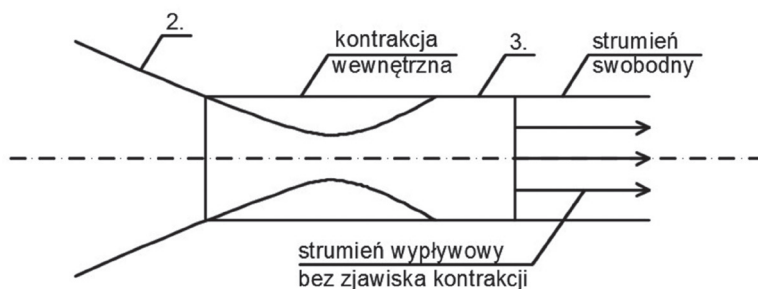
W początkowym etapie stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych starano się maksymalnie zmniejszyć średnicę wylotową prądownicy, powodując jednocześnie wzrost prędkości wylotowej. Można to było osiągnąć, stosując dyszę w kształcie stożka ściętego (o zbieżnej tworzącej ścianki). W celu otrzymania swobodnego strumienia zwanego badanie eksperymentalne wykazały konieczność stosowania walcowej wstawki uspakajającej, co ostatecznie zadecydowało o kształcie stosowanych w praktyce prądownic. Rozwiązanie takiej prądownicy pokazano na rys. 1 [1].

Należy zauważyć, że w tzw. „pyszczku” występuje kontrakcja wewnętrzna pokazana na rys. 2. Kontrakcja ta rośnie ze wzrostem kąta zbieżności w końcowym odcinku tworzących ścian stożkowej części prądownicy.



**Rys. 1. Schemat prądownicy o zwartym strumieniu swobodnym: 1 – urządzenie odcinające, 2 – część stożkowa, 3 – wstawka uspakajająca przepływ (pyszczek)**

Źródło: opracowanie własne



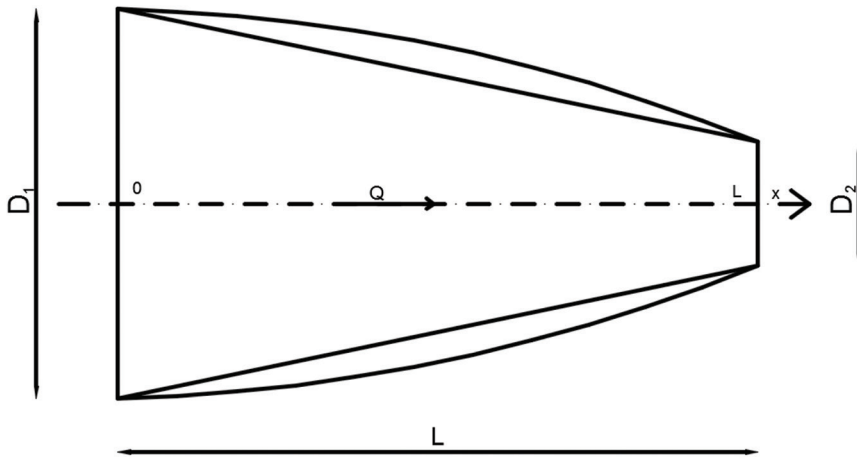
**Rys. 2. Kontrakcja wewnętrzna strumienia we wstawce uspakajającej (pyszczeniu)**

Źródło: opracowanie własne

Celem niniejszego artykułu jest analiza wpływu kształtu stożkowej części prądownicy na jej właściwości hydrauliczne, obejmujące prędkość i przyspieszenie strumienia na kierunku przepływu, a także straty ciśnienia wywołane oporami tarcia. W rozważaniach przyjęto trzy rodzaje tworzącej części stożkowej: w postaci linii wklęsłej, prostej oraz wypukłej. Dla zadanej średnicy wlotowej 52 mm rozpatrzone zostały średnice wylotowe równe: 9, 10, 11, 12, 13 mm.

## 1. Wpływ kształtu tworzącej stożka prądownicy na parametry strumienia

Istotne jest określenie warunków przepływu, przy których straty ciśnienia będą jak najmniejsze. Można to osiągnąć m.in. dobierając odpowiedni kształt części stożkowej prądownicy. Ma on wpływ na rozkład prędkości i przyspieszenia strumienia na długości tej części prądownicy.



**Rys. 3. Schemat przewodu stożkowego**

Źródło: opracowanie własne

Wraz ze zmianą kształtu tworzącej ścianki części stożkowej, zmienia się średnica wzdłuż długości stożka. Do opisu zmiany średnicy zastosowano następującą funkcję potęgową:

$$D(x) = b \cdot x^c + d \text{ [m]} \quad (1)$$

która jest spełniona dla  $x = \langle 0, L \rangle$ . Poza tym zakresem funkcja ta jest stała, czyli jest klasy  $C^0$ .

Warunki brzegowe opisane są następująco:

$$\begin{cases} D_1 = b \cdot 0^c + d \\ D_2 = b \cdot L^c + d \end{cases} \quad (2)$$

Układ ten można też zapisać w postaci:

$$\begin{cases} D_1 = d \\ D_2 - D_1 = b \cdot L^c \end{cases} \quad (3)$$

lub

$$\begin{cases} D_1 = d \\ \frac{D_2 - D_1}{L^c} = b \end{cases} \quad (4)$$

Podstawiając (4) do (1), dla  $x = \langle 0, L \rangle$ , otrzymuje się:

$$D(x) = \frac{D_2 - D_1}{L^c} \cdot x^c + D_1 \quad (5)$$

gdzie:

$D_1$  – średnica wlotowa [m];

$D_2$  – średnica wylotowa [m];

$L$  – długość prądownicy [m];

$c$  – wykładnik (współczynnik) kształtu [-];

$x$  – odległość, liczona od wlotu do stożka, na której znajduje się rozważana średnica  $D$  [m].

Wraz ze zmianą kształtu tworzącej ścianki części stożkowej, zmienia się wartość przyspieszenia strumienia na długości. Przyspieszenie zostało policzone jako pierwsza pochodna prędkości.

Z równania ciągłości ruchu ustalonego można wyznaczyć średnią prędkość przepływu, dla  $x = \langle 0, L \rangle$ :

$$v(x) = \frac{Q}{A(x)} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2(x)} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (6)$$

gdzie:

$Q$  – objętościowe natężenie przepływu [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];

$A(x)$  – powierzchnia przekroju poprzecznego prądownicy w odległości  $x$  liczonej od wlotu do stożka [ $\text{m}^2$ ].

Wstawiając (5) do (6), otrzymuje się:

$$v(x) = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \left( \frac{D_2 - D_1}{L^c} \cdot x^c + D_1 \right)^2} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (7)$$

Pochodna prędkości wynosi:

$$a_k(x) = \frac{dv}{dt} = v(x) \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{4 \cdot Q}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{D^2(x)} \right)' = \frac{4 \cdot Q}{\pi} \cdot \frac{-2 \cdot D(x) \cdot D'(x)}{D^4(x)} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{8 \cdot Q}{\pi} \cdot \frac{D'(x)}{D^3(x)} \quad (10)$$

Do obliczenia przyspieszenia (8) wykorzystano wzór (6) i (10), otrzymując:

$$a_k(x) = \left[ \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2(x)} \right] \cdot \left[ -\frac{8 \cdot Q}{\pi} \cdot \frac{D'(x)}{D^3(x)} \right] = -\frac{32 \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \frac{D'(x)}{D^5(x)} \quad (11)$$

$$a_k(x) = -\frac{32 \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \frac{c \cdot \frac{D_2 - D_1}{L^c} \cdot x^{c-1}}{D^5(x)} \quad (12)$$

$$a_k(x) = -\frac{32 \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \frac{c \cdot \frac{D_2 - D_1}{L^c} \cdot x^{c-1}}{\left( \frac{D_2 - D_1}{L^c} \cdot x^c + D_1 \right)^5} \quad (13)$$

Zmiana średnicy na długości uzależniona jest od:

$D_1$  – stała wartość wynosząca 45 mm. Wąż płasko składany o średnicy wewnętrznej 52 mm zakończony jest łącznikiem, którego tuleja ma średnicę wewnętrzną 44,5–45 mm;

$D_2$  – zmienna wartość wynosząca kolejno 9, 10, 11, 12, 13 mm.

Jako długość prądownicy przyjęto  $L = 0,3$  m.

Kształt prądownicy jest zależny od wykładnika  $c$ . W stożkowych prądownicach tworząca ścianki stożka jest odcinkiem linii prostej, dlatego  $c = 1$ . Przeanalizowano zmiany średnicy, prędkości i przyspieszenia, gdy  $c$  wzrośnie o 25% i zmaleje o 25%.

## 2. Rozkład prędkości i przyspieszenia strumienia w prądownicy

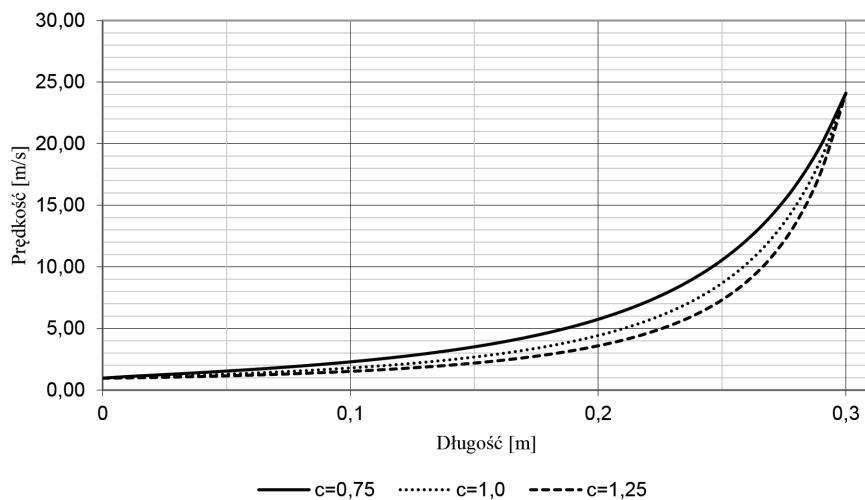
Rozpatrywany jest model jednowymiarowego przepływu ustalonego, w którym prędkość i przyspieszenie są jedynie funkcją położenia. W tabeli 2 zestawiono wartości średnich prędkości przyspieszenia strumienia wody dla średnicy pyszczka prądownicy  $D_2 = 9$  mm i wydajności  $Q = 92$  dm<sup>3</sup>/min, natomiast na rys. 4–9 zmiany prędkości i przyspieszenia strumienia wody wzdłuż długości prądownicy obliczone dla trzech różnych średnic wylotowych  $D_2 = 9, 11$  i 13 mm.

Tabela 2. Prędkości i przyspieszenia dla  $D_2 = 9\text{mm}$  i  $Q = 92\text{ dm}^3/\text{min}$ 

$D_2 = 9\text{mm}$ $Q = 92\text{ l/min}$												
x	c = 0,75				c = 1,0				c = 1,25			
	$D_2$ m	v m/s	$a_k$ m/s <sup>2</sup>	$D_2$ m	v m/s	$a_k$ m/s <sup>2</sup>	$D_2$ m	v m/s	$a_k$ m/s <sup>2</sup>	$D_2$ m	v m/s	$a_k$ m/s <sup>2</sup>
0	0,0450	0,96	0,00	0,0450	0,96	0,00	0,0450	0,96	0,00	0,0450	0,96	0,00
0,06	0,0342	1,67	21,82	0,0378	1,37	11,85	0,0402	1,21	7,30			
0,12	0,0269	2,70	61,33	0,0306	2,08	34,10	0,0335	1,73	21,40			
0,18	0,0205	4,66	217,54	0,0234	3,57	130,38	0,0260	2,89	84,87			
0,24	0,0145	9,22	1113,32	0,0162	7,44	819,84	0,0178	6,19	611,57			
0,27	0,0117	14,18	3164,79	0,0126	12,30	2880,39	0,0134	10,80	2537,53			
0,3	0,0090	24,10	11618,59	0,0090	24,10	15491,45	0,0090	24,10	19364,31			

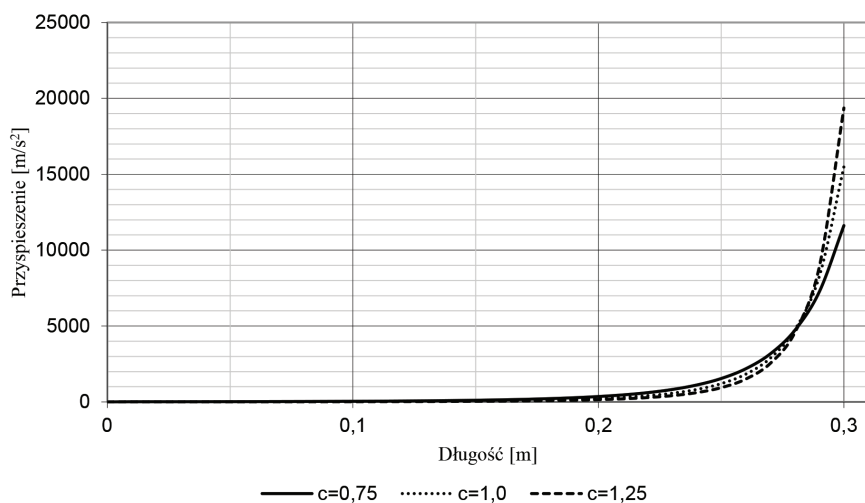
Źródło: opracowanie własne





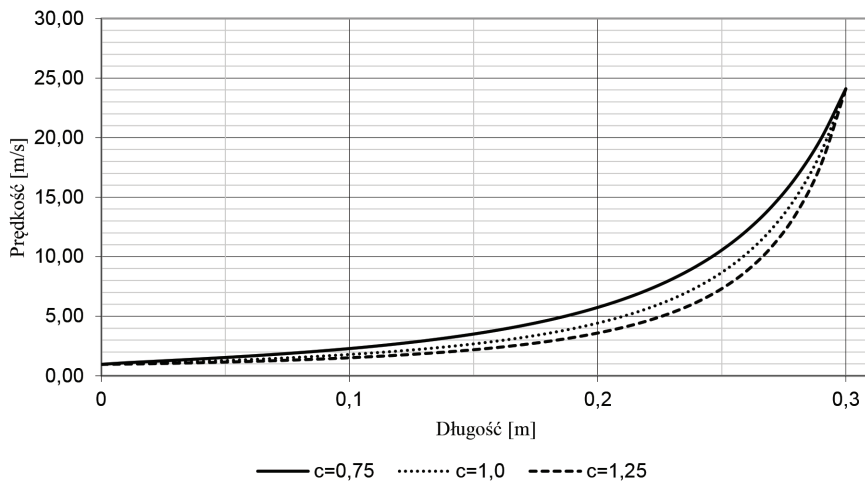
**Rys. 4.** Zmiana średniej prędkości strumienia wody w prądownicy w zależności od wartości wykładnika  $c$  dla  $D_2 = 9\text{mm}$  i  $Q = 92\text{ dm}^3/\text{s}$

Źródło: opracowanie własne



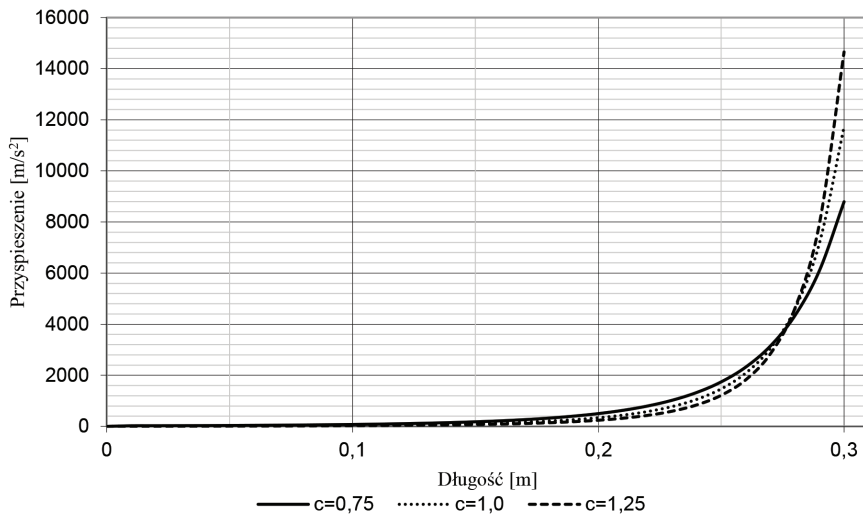
**Rys. 5.** Zmiana średniego przyspieszenia strumienia wody w prądownicy w zależności od wartości wykładnika  $c$  dla  $D_2 = 9\text{ mm}$  i  $Q = 92\text{ dm}^3/\text{s}$

Źródło: opracowanie własne



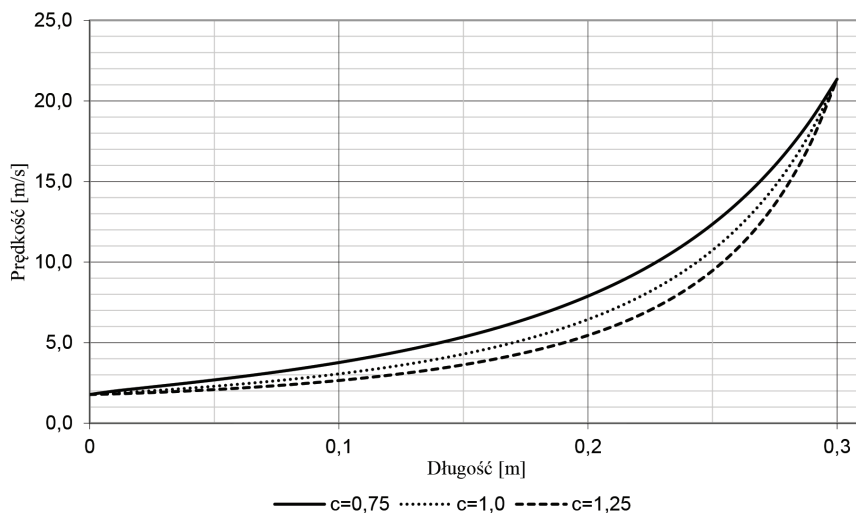
**Rys. 6.** Zmiana średniej prędkości strumienia wody w prądownicy w zależności od wartości wykładnika  $c$  dla  $D_2 = 11$  mm i  $Q = 92$  dm<sup>3</sup>/s

Źródło: opracowanie własne



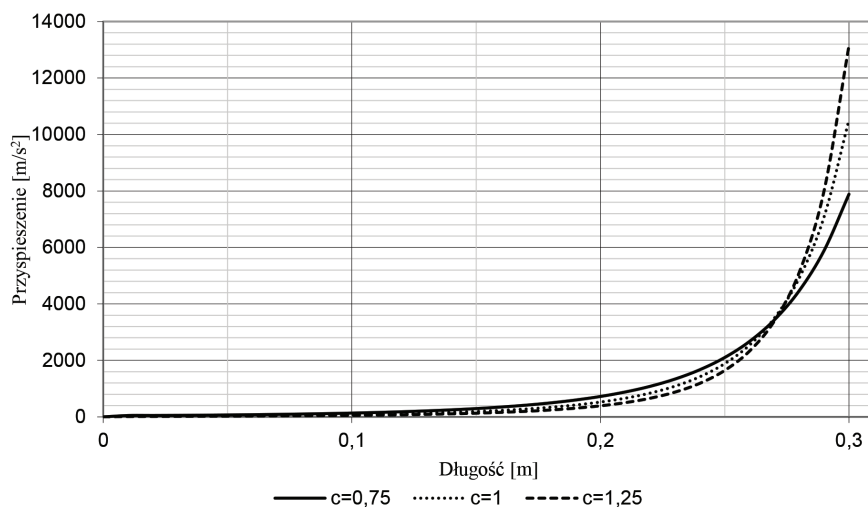
**Rys. 7.** Zmiana średniego przyspieszenia strumienia wody w prądownicy w zależności od wartości wykładnika  $c$  dla  $D_2 = 11$  mm i  $Q = 92$  dm<sup>3</sup>/s

Źródło: opracowanie własne



**Rys. 8.** Zmiana średniej prędkości strumienia wody w prądownicy w zależności od wartości wykładnika  $c$  dla  $D_2 = 13$  mm i  $Q = 92$  dm<sup>3</sup>/s

Źródło: opracowanie własne



**Rys. 9.** Zmiana średniego przyspieszenia strumienia wody w prądownicy w zależności od wartości wykładnika  $c$  dla  $D_2 = 13$  mm i  $Q = 92$  dm<sup>3</sup>/s

Źródło: opracowanie własne

### 3. Straty ciśnienia w przewodnicy

Straty ciśnienia strumienia wody w przewodnicy równają się sumie strat w zaworze, części stożkowej i wstawce uspokajającej. Straty w zaworze zostały pominięte.

Liniowe straty ciśnienia w części stożkowej (rys. 10) obliczane są za pomocą wzoru Darcy'ego – Weisbacha:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad [\text{Pa}] \quad (14)$$

lub

$$h_{\text{str}} = \frac{\Delta p}{\rho g} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [\text{m sł. H}_2\text{O}] \quad (15)$$

gdzie:

$\lambda$  – współczynnik oporów liniowych [-];

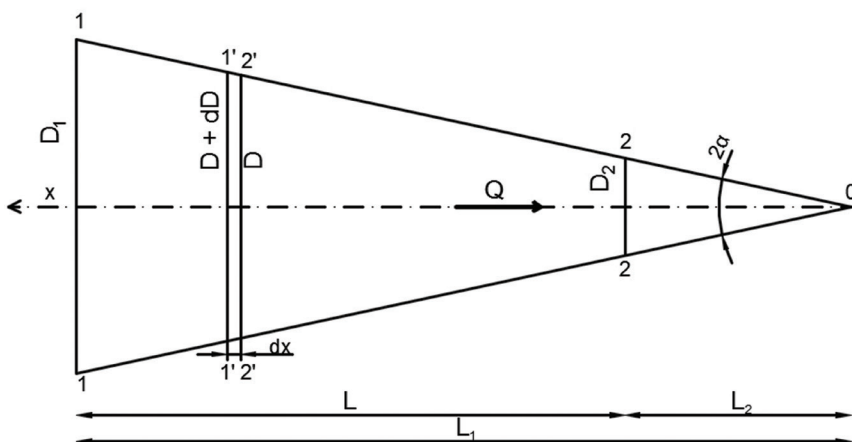
$L$  – długość przewodu [m];

$D$  – średnica wewnętrzna przewodu [m];

$v$  – średnia prędkość w przekroju poprzecznym [m/s];

$\rho$  – gęstość wody [ $\text{kg/m}^3$ ];

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m/s}^2$ ].



**Rys. 10. Schemat przewodu stożkowego**

Źródło: opracowanie własne na podstawie [6]

Wysokość strat ciśnienia na długości  $dx$  konfuzora pomiędzy przekrojami  $1' - 1'$ ,  $2' - 2'$ , można obliczyć z następującego wzoru:

$$dh_{\text{str}} = \frac{\lambda'}{D(x)} \cdot \frac{v(x)^2}{2g} dx \quad (16)$$

gdzie:

$\lambda'$  – współczynnik oporów liniowych na tym odcinku [-].

Biorąc pod uwagę wzór (6) wysokość strat ciśnienia na długości  $dx$  konfuzora, dla przekroju  $1' - 1'$ ,  $2' - 2'$ , można zapisać:

$$dh_{\text{str}} = \lambda' \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D(x)^5} dx \quad (17)$$

Całkowita wysokość strat ciśnienia na długości  $L$  konfuzora opisana jest za pomocą całki oznaczonej:

$$h_{\text{str}} = - \int_{L_1}^{L_2} \frac{\lambda' \cdot 8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} dx = \int_{L_2}^{L_1} \frac{\lambda' \cdot 8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} dx \quad (18)$$

Wykorzystując własności trygonometryczne:

$$dD = 2 \cdot \operatorname{tg}\alpha dx \quad (19)$$

$$dx = \frac{dD}{2 \cdot \operatorname{tg}\alpha} \quad (20)$$

Otrzymano:

$$h_{\text{str}} = \lambda \int_{D_2}^{D_1} \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot \frac{dD}{2 \cdot \operatorname{tg}\alpha} \quad (21)$$

gdzie:

$\lambda$  – uśredniona wartość współczynnika dla całego przedziału [-].

$$h_{\text{str}} = \lambda \frac{4 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot \operatorname{tg}\alpha} \cdot \int_{D_2}^{D_1} \frac{dD}{D(x)^5} \quad (22)$$

$$h_{\text{str}} = -\lambda \frac{Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot \text{tg}\alpha} \cdot \left( \frac{1}{D_1^4} - \frac{1}{D_2^4} \right) \quad (23)$$

$$h_{\text{str}} = \lambda \frac{Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot \text{tg}\alpha \cdot D_2^4} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^4 \right] \quad (24)$$

Z rys. 4 wynika, że:

$$\text{tg}\alpha = \frac{D_1 - D_2}{2L} \quad (25)$$

Wstawiając (25) do równania (24), otrzymuje się:

$$h_{\text{str}} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{L}{D_1 - D_2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^4 \right] \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_2^4} \quad (26)$$

$$h_{\text{str}} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{L}{D_2} \cdot \left[ \frac{D_2}{D_1} + \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 + \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3 + \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^4 \right] \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_2^4} \quad (27)$$

lub

$$h_{\text{str}} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{L}{D_2} \cdot \left[ \frac{D_2}{D_1} + \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 + \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3 + \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^4 \right] \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (28)$$

Wysokość strat ciśnienia w konfuzorach przedstawione są również w literaturze w postaci wzoru Fliegnera:

$$h_{\text{str}} = \lambda \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot \sin\alpha \cdot D_2^4} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^4 \right] [\text{m sł. H}_2\text{O}] \quad (29)$$

który dla małych kątów ( $\text{tg} \cong \sin\alpha$ ) odpowiada równaniu (24)

Zatem równanie wygląda następująco:

$$h_{\text{str}} = \lambda \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_2^4} \cdot \frac{2 \cdot L}{(D_1 - D_2)} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^4 \right] [\text{m sł. H}_2\text{O}] \quad (30)$$

Równania (28) i (29) są zalecane do obliczeń strat ciśnienia w długich konfuzorach. Współczynnik oporów liniowych wynosi średnią całkową wartość dla analizowanego stożkowego przewodu [1]. Do wyznaczenia współczynnika oporów liniowych zastosowano wzór Prandtla – Nikuradsego dla strefy kwadratowej turbulentnego przepływu [2, 4].

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \frac{k}{3,71 \cdot D_{\text{sr}}} \quad (31)$$

$$\lambda = \left( \frac{1}{-2 \lg \frac{\varepsilon}{3,71}} \right)^2 [-] \quad (32)$$

gdzie:

$\varepsilon$  – jest chropowatością względną zdefiniowaną jako stosunek chropowatości bezwzględnej do średniej arytmetycznej wartości średnicy wewnętrznej przedziału stożka.

$$\varepsilon = \frac{k}{D_{\text{sr}}} [-] \quad (33)$$

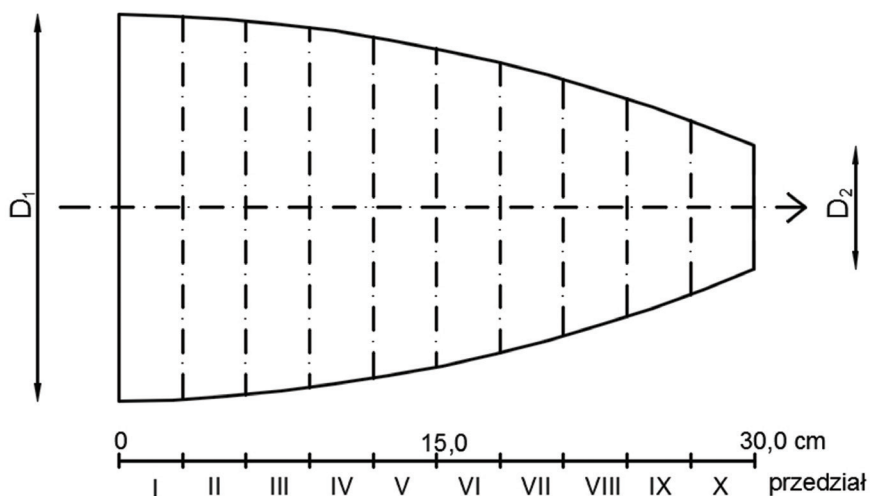
gdzie:

$k$  – chropowatość bezwzględna [m];

$D_{\text{sr}}$  – średnia arytmetyczna wartość średnicy wewnętrznej odpowiadająca przedziałowi [m].

$$D_{\text{sr}} = \frac{(D_1 + D_2)}{2} [\text{m}] \quad (34)$$

Straty ciśnienia w przedziale stożkowym o tworzącej liniowej mogą być liczone dla całego odcinka z zastosowaniem wzoru Fliegnera (30). W przypadku przewodu stożkowego o tworzącej krzywoliniowej ( $c \neq 1$ ) obliczenia, z wykorzystaniem wzoru Fliegnera, powinny być przeprowadzone przy podziale na  $n$  części (odcinki różnicowe). W każdym z tych odcinków krzywizna stożka zastąpiona jest tworzącą liniową.



**Rys. 11. Schemat podziału przodownicy na 10 części**

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 3. Przykładowe obliczenia strat ciśnienia dla  $D_2 = 9\text{ mm}$ ,  $Q = 92\text{ dm}^3/\text{min}$**

Przedział	$x_p$	$x_k$	$c=0,75$					
			$D_p$	$D_k$	$D_{\text{sr}}$	$\epsilon$	$\lambda$	$h_{\text{str}}$
			m	m	M	-	-	m <sub>sl.H20</sub>
2	0,030	0,060	0,039	0,034	0,036	0,0008	0,019	0,011
4	0,090	0,120	0,030	0,027	0,029	0,0010	0,020	0,039
6	0,150	0,180	0,024	0,020	0,022	0,0014	0,021	0,140
8	0,210	0,240	0,017	0,015	0,016	0,0019	0,023	0,644
10	0,270	0,300	0,012	0,009	0,010	0,0029	0,026	5,251

Źródło: opracowanie własne

W rozważaniach stożek podzielony został na 10 przedziałów (rys. 11). Przeanalizowano zmiany strat ciśnienia, gdy  $c$  wzrośnie o 25% i zmaleje o 25%. Przykładowe obliczenia dla  $D_2 = 9\text{ mm}$  i  $Q = 92\text{ dm}^3/\text{min}$  podano w tabeli 3, zaś wyniki zbiorcze zostały przedstawione w tabeli 4.



**Tabela 4. Straty ciśnienia w części stożkowej**

$D_2$	Q	V	$h_{str} \text{ m}_{sl.H20}$		
			c=0,75	c=1,0	c=1,25
0,009	92	24,10	8,1281	5,5197	4,1418
0,010	110	23,98	8,6460	5,8565	4,3832
0,011	136	23,85	9,2081	6,2334	4,6610
0,012	144	21,22	7,8511	5,3204	3,9810
0,013	170	21,34	8,5649	5,8189	4,3635

Źródło: opracowanie własne

Straty ciśnienia na długości w odcinku uspokajającym zostały policzone za pomocą wzoru Darcy'ego – Weisbacha:

$$h_{str} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (35)$$

gdzie L – długość wstawki walcowej.

Wykorzystując równie ciągłości ruchu ustalonego, otrzymuje się:

$$h_{str} = \lambda \cdot \frac{8 \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4} \quad (36)$$

Do wyznaczenia współczynnika oporów liniowych zastosowano wzór Prandtla – Nikuradsego dla strefy kwadratowej turbulენტnego przepływu [4].

Długość wstawki uspokajającej (pyszczka) przyjmowana jest w zależności od średnicy wylotowej  $D_2$  [1]. Dla krzywizny wypukłej, ze względu na najwyższe przyspieszenia i największą zbieżność w części końcowej stożka, wskazane jest wydłużenie pyszczka, np. do  $1,5 \div 1,8 D_2$ . Dla stożka o liniowej tworzącej długość pyszczka może wynosić np.  $1,3 \div 1,4 D_2$ , a dla wklęsłej tworzącej można przyjąć np.  $1,0 \div 1,2 D_2$ . Obliczenia strat hydraulicznych w części uspakajającej zostały wykonane dla długości pyszczka:  $1,7D_2$ ,  $1,3D_2$  i  $1,1D_2$ . Wyniki przedstawiono w tabeli 5. Suma strat części stożkowej i wstawki uspakajającej zostały przedstawione w tabeli 6.

**Tabela 5. Straty ciśnienia we wstawce uspakajającej**

Dane wyjściowe			c=0,75		c=1,0		c=1,25	
D <sub>2</sub>	Q	v	L <sub>1,1</sub>	h <sub>str</sub>	L <sub>1,3</sub>	h <sub>str</sub>	L <sub>1,7</sub>	h <sub>str</sub>
m	l/s	m/s	M	m <sub>sl.H20</sub>	[m]	m <sub>sl.H20</sub>	[m]	m <sub>sl.H20</sub>
0,009	92	24,10	0,0099	0,008	0,0117	0,009	0,0153	0,012
0,010	110	23,98	0,0110	0,008	0,0130	0,010	0,0170	0,013
0,011	136	23,85	0,0121	0,009	0,0143	0,011	0,0187	0,014
0,012	144	21,22	0,0132	0,008	0,0156	0,009	0,0204	0,012
0,013	170	21,34	0,0143	0,008	0,0169	0,010	0,0221	0,012

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 6. Suma strat w części stożkowej i we wstawce uspakajającej**

Dane wyjściowe			c=0,75			c=1,0			c=1,25		
D <sub>2</sub>	Q	v	h <sub>str</sub> stożek	h <sub>str</sub> pyszczek	Σh <sub>str</sub>	h <sub>str</sub> stożek	h <sub>str</sub> pyszczek	Σh <sub>str</sub>	h <sub>str</sub> stożek	h <sub>str</sub> pyszczek	Σh <sub>str</sub>
m	dm <sup>3</sup> /s	m/s	m <sub>sl.H20</sub>	m <sub>sl.H20</sub>	m <sub>sl.H20</sub>	m <sub>sl.H20</sub>	m <sub>sl.H20</sub>	m <sub>sl.H20</sub>	m <sub>sl.H20</sub>	m <sub>sl.H20</sub>	m <sub>sl.H20</sub>
0,009	92	24,10	8,128	0,008	8,1	5,520	0,009	5,5	4,142	0,012	4,2
0,010	110	23,98	8,646	0,008	8,7	5,857	0,010	5,9	4,383	0,013	4,4
0,011	136	23,85	9,208	0,009	9,2	6,233	0,011	6,2	4,661	0,014	4,7
0,012	144	21,22	7,851	0,008	7,9	5,320	0,009	5,3	3,981	0,012	4,0
0,013	170	21,34	8,565	0,008	8,6	5,819	0,010	5,8	4,364	0,012	4,4

Źródło: opracowanie własne

## Podsumowanie i wnioski

Kształt stożkowej części prądownicy w sposób istotny wpływa na właściwości hydrauliczne – prędkość i przyspieszenie strumienia na kierunku przepływu. Przyjęcie tworzącej części stożkowej w postaci linii wklęsłej, prostej lub wypukłej ma znaczący wpływ na straty ciśnienia wywołane oporami tarcia. Jednocześnie, kształt stożkowej części prądownicy ma wpływ na wewnętrzną kontrakcję strumienia we wstawce uspokajającej (pyszczyku). W celu zapewnienia równoległości strug cieczy wypływających z prądownicy i tym samym zneutralizowania wpływu kontrakcji, jest konieczne dostosowanie długości pyszczyka do kształtu stożkowej części prądownicy. W artykule do analizy właściwości hydraulicznych przyjęty został model jednowymiarowego, ustalonego przepływu, w którym prędkość i przyspieszenie wody są funkcją położenia (na kierunku przepływu).

Analiza wpływu kształtu stożkowej części prądownicy na jej właściwości hydrauliczne przeprowadzona była dla średnicy wlotowej 45 mm i średnic wylotowych 9, 11 i 13 mm. Zmiana wykładnika kształtu  $c$  o 25% przyczyniła się do sformułowania następujących wniosków:

1. Prędkość strumienia cieczy średnicy wylotowej z prądownicy dla zadanej średnicy wylotowej, zgodnie z równaniem ciągłości przepływu, jest taka sama dla każdej wartości wykładnika  $c$ . Zmiana wykładnika  $c$  nie wpływa więc na wartość prędkości w momencie wypływu z części stożkowej do pyszczyka prądownicy.
2. Przyspieszenie strumienia w przekroju wylotowym z części stożkowej zależy od średnicy wylotowej  $D_2$  oraz wykładnika  $c$ . Przyspieszenie to osiąga największe wartości dla najmniejszej średnicy  $D_2$  i maleje dla rosnących wartości średnicy wylotowej. Przykładowo dla  $D_2 = 9$  mm, dla wykładnika  $c = 1$ , przyspieszenie końcowe wynosi  $a_k = 15491,5$  m/s<sup>2</sup>. Ze wzrostem wartości wykładnika  $c$  rośnie przyspieszenie średnicy wylotowej z części stożkowej. Dla wykładnika  $c = 0,75$  (tworząca wklęsła) i wykładnika  $c = 1,25$  (tworząca wypukła) wartości przyspieszenia średnicy wylotowej, dla  $D_2 = 9$  mm różnią się prawie 4000 m/s<sup>2</sup>.
3. Przyspieszenie średnicy wylotowej z części stożkowej jest największe w porównaniu z wartościami przyspieszenia na całej długości części stożkowej. Ma to istotny wpływ na wzrost kontrakcji strumienia we wstawce uspokajającej. Odnosi się to w szczególności do wypukłej tworzącej stożka.

- W tym przypadku konieczne jest pewne zwiększenie długości pyszczka, która zapewni równoległość strug cieczy wypływających z prądownicy.
4. Straty w wstawce uspakajającej, przyjmując jej długość nawet  $L = (1,6 \div 1,8) D_2$ , są wyraźnie mniejsze niż w części stożkowej i nie mają znacznego wpływu na całkowite straty ciśnienia prądownicy.
  5. Dla tworzącej wklęsłej ( $c = 0,75$ ) w porównaniu do tworzącej wypukłej ( $c = 1,25$ ) średnie prędkości wzdłuż całej długości pyszczka prądownicy przyjmują największe wartości, zaś przyspieszenie średnicy wylotowej ma wartość najmniejszą. Straty ciśnienia są wówczas wyraźnie większe od prostej i wypukłej tworzącej stożka.
  6. Prądownica o wypukłej tworzącej jest więc najkorzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia minimalizacji oporów tarcia. Z praktycznego punktu widzenia, pewnym wyzwaniem przy wymiarowaniu części stożkowej prądownicy pozostaje dobór krzywizny wypukłości, co wiąże się z przyjęciem wartości wykładnika  $c > 1$ .

## Literatura

- [1] Derecki T., Sprzęt pożarniczy do podawania wody i pian gaśniczych, Wydawnictwo SGSP, Warszawa 1999.
- [2] Gałaj J., Pawlak A., Pawlak E., Zegar W., Ćwiczenia laboratoryjne z hydromechaniki dla studentów SGSP z przykładami, Wydawnictwo SGSP, Warszawa 2016.
- [3] Linder J., Struś W., Przeciwożarowe urządzenia i instalacje wodne, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1977.
- [4] Mitosek, M., Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [5] Polska Norma PN-EN 671-2, 2012: Stałe urządzenia gaśnicze. Hydranty wewnętrzne. Część 2: Hydranty wewnętrzne z węzłem płasko składanym.
- [6] Przydatek M., Analiza kształtu stożkowej części prądownicy na jej właściwości hydrauliczne, praca dyplomowa magisterska – w przygotowaniu, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2018.
- [7] Przydatek M., Właściwości hydrauliczne hydrantów wewnętrznych, praca dyplomowa inżynierska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2016.