DOI: 10.37105/enex.2022.1.02

ENGINEERING EXPERT
RZECZOZNAWCA

Dobór kształtu przekroju poprzecznego kanałów na potrzeby schronowych instalacji wentylacyjnych – analiza

Emil SMYK[1] (*ORCID ID: 0000-0003-2652-5414*)
Marek MARKOWICZ[2] (*ORCID ID: 0000-0002-1452-787X*)
Mikołaj SZYCA[3] (*ORCID ID: 0000-0002-1331-5592*)
[1] Politechnika Bydgoska, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, PL
[2] Szkoła Doktorska Nauk Inżynieryjno-Technicznych na Politechnice Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, PL
[3] PESA Bydgoszcz SA, 85-082 Bydgoszcz, ul. Zygmunta Augusta 11, PL

Streszczenie: Kanały wentylacyjne są podstawowym elementem każdego układu wentylacyjnego. W pracy zaprezentowano trzy kształty kanałów wentylacyjnych stosowanych w przemyśle oraz omówiono je z szczególnym uwzględnieniem możliwości zastosowania ich w budowie schronów. Kanały o przekroju okrągłym, kanały o przekroju prostokątnym oraz kanały o przekroju prostokątnym z zaokrąglonymi rogami. Przeanalizowano parametry przepływowe oraz wytrzymałościowe wskazanych kanałów, jak również przedstawiono wady i zalety poszczególnych rozwiązań. Na podstawie przeprowadzonej analizy wskazano luki wiedzy.

Słowa kluczowe: wentylacja, przepływy wewnętrzne, straty miejscowe, schrony.

Oficjalną wersją publikacji jest wersja anglojęzyczna – posiada DOI. Niniejszy plik jest polskojęzyczną wersją.

Zacytuj ten artykuł w następujący sposób:

Smyk, E., Markowicz, M., Szyca, M., Selection of the cross-section area shape of the ducts used in the shelter ventilation systems - analysis, Engineering Expert, p. 9-17, No. 1, 2022, DOI: 10.37105/enex.2022.1.02

1. Wstęp

Budownictwo schronowe od wielu lat jest jednym z ważniejszych tematów poruszanych przez naukowców zajmujących się szeroko rozumianym budownictwem. Zarówno aspekty prawne (Baryłka & Baryłka, 2012; Kwiatkowski, 2012; Szcześniak et al., 2017) jak i techniczne (Harmata et al., 2017; Wasilczuk, 2017, 2019) budzą duże zainteresowanie i stanowią przedmiot publikacji i konferencji naukowych na świecie. Ponadto problem budowy i eksploatacji schronów stał się szczególnie ważny i coraz częściej poruszany ze względu na narastający konflikt w Ukrainie. Schrony muszą zapewniać szereg konkretnych funkcji, a do najważniejszych możemy zaliczyć (Wasilczuk, 2019):

- ochronę przed pierwotnymi i wtórnymi skutkami działania broni masowego rażenia;
- ochronę przed bronią chemiczną oraz biologiczną;
- odpowiednie warunki bytowania.

Aby poprawnie realizować wspomniane wyżej funkcje schrony powinny być wyposażone w odpowiednią wentylację zapewniającą wymianę powietrza, ale również ewentualne zabezpieczenie przed falą uderzeniową. Szcześniak et al. (2010) zaprezentowali pierwszą polską konstrukcję automatycznego zaworu przeciwwybuchowego. Głównym zadaniem zaworu była ochrona instalacji wentylacyjnej schronu przed działaniem fali uderzeniowej. Zawór charakteryzował się niewielkimi oporami hydraulicznymi (≤ 300 Pa) oraz wysokim maksymalnym natężeniem przepływu (do 30 000 m^3/h). Kamionek

& Harmata (2020) przedstawili ogólne informacje związane z oczyszczaniem powietrza w stałych obiektach ochrony (schronach). Przedstawili możliwe zagrożenia oraz różne systemy wentylacji (system nawiewny, system nawiewno–wyciągowy, system recyrkulacji). Publikacja (Kamionek & Harmata 2020)) stanowi jedno z obszerniejszych, a zarazem dostępnych powszechnie opracowań dotyczących systemów wentylacyjnych w schronach. Harmata et al. (2017) skupili się na ogólnych zasadach wykorzystania i klasyfikacji środków przed skażeniem. W pracy tej autorzy zwrócili jednak uwagę na problem odprowadzenia ciepła ze schronu oraz przedstawili ogólne zasady i metodykę wyliczania ilości ciepła i wilgoci pochodzącej od gruntu, ludzi, oświetlenia elektrycznego, urządzeń łączności, informatyki i innych. Logachev et al. (2015) zaproponowali wykorzystanie wentylacji recyrkulacyjnej, która pozwoliła na zmniejszenie ilości powietrza wydmuchiwanego ze schronu poprzez zastosowanie bypassa o 40%. Ovsyannikov et al. (2017) również wskazują na możliwość wykorzystania recyrkulacji do zmniejszenia ilości wymienianego powietrza. Rozwiązanie to minimalizuje ilość gazów jakie potencjalnie mogą dostawać się do schronu przez nieszczelności.

Autorzy wspomnianych prac skupili się na wykorzystaniu instalacji mechanicznej, natomiast Mukhtar et al. (2017, 2018) przeprowadzili obliczenia numeryczne wentylacji grawitacyjnej z uwzględnieniem kabli emitujących ciepło. Obliczenia przeprowadzono dla różnych parametrów otwarcia wziewni oraz wyrzutni powietrza oraz dla różnej konstrukcji kanału doprowadzającego powietrze (zastosowanie innego kolana). Wyniki obliczeń numerycznych pokryły się z pomiarami rzeczywistymi. Eksperyment pozwolił na określenie rozkładu linii prądu i prędkości przepływu w symulowanym obiekcie. Z kolei inni badacze zwrócili uwagę na możliwość wykorzystania w systemie szczelin z systemem przegród (Averkova et al., 2010; Logachev, Khodakov, et al., 2015).

Omówione prace skupiają się na systemach wentylacyjnych lub ich elementach. Brakuje jednak publikacji omawiających rodzaj stosowanych kanałów wentylacyjnych w budowie schronów. Z tego powodu w tym artykule omówiono stosowane w przemyśle kształty kanałów wentylacyjnych i ich parametry istotne z punktu widzenia eksploatacji schronów. Dodatkowym celem publikacji jest również zwrócenie uwagi na problem jakim jest odpowiedni dobór kanałów oraz konieczność dalszego prowadzenia badań w zakresie tej tematyki.

2. Kształty kanałów wentylacyjnych

W budownictwie wykorzystuje się dwa podstawowe kształty pól przekrojów kanałów wentylacyjnych. W przypadku małych średnic kanału stosuje się powszechnie kanały o przekroju kołowym, natomiast w przypadku przekrojów większych stosuje się kanały o przekroju prostokątnym (rys. 1). Jest to związane z tym, że kanał prostokątny przy tym samym polu przekroju jest niższy niż kanał okrągły, a więc stosowanie kanałów prostokątnych pozwala na projektowanie niższych kondygnacji przy zachowaniu określonych w normach maksymalnych prędkościach przepływu. Jest to zauważalne nawet w przypadku niewielkich kanałów. Na przykład kanał o przekroju okrągłym i średnicy zewnętrznej 320 mm ma porównywalne pole przekroju do kanału prostokątnego o wymiarach zewnętrznych 200x400 mm.

Rys. 1. Przykład zastosowania kanału prostokątnego w budownictwie cywilnym.

Innym typem kanału wentylacyjnego jest kanał o przekroju prostokątnym z zaokrąglonymi rogami (rys. 2). Kanały te stosowane są w przemyśle i są produkowane między innymi przez NucAir Technologies Sp. z o.o. Stanowią jednak rozwiązanie stosunkowo nowe, w związku z czym ilość badań dotyczących ich parametrów technicznych jest ograniczona.

Rys. 2. Przykład kanałów o przekroju prostokątnym z zaokrąglonymi rogami.

Spełnianie tych samych kryteriów jest kluczowym determinantem w doborze kanałów celem ich porównywania. W przypadku kanałów wentylacyjnych należałoby posłużyć się średnicą hydrauliczną:

$$D_h = \frac{4A}{P} \tag{1}$$

gdzie:
A – pole przekroju poprzecznego kanału, m^2;
P – długość obwodu zwilżonego, m.

Jednak ze względu na to, że prędkość powietrza w kanałach wentylacyjnych nie powinna przekraczać określonych wartości; aby nie generować nadmiernego hałasu, najczęściej kanały okrągłe zastępuje się kanałami prostokątnymi o takim samym albo podobnym polu przekroju. W związku z powyższym w niniejszej pracy porównane zostały kanały o parametrach spełniających ten warunek (Tabela 1). Dobierając kanały o przekroju prostokątnym z zaokrąglonymi brzegami zastosowano wymiary kanału prostokątnego oraz dwóch różnych promieni zaokrągleń narożników. Dodatkowo w Tabeli 1 pokazano kształt przekroju poprzecznego kanału. Kanały dobrano w ten sposób pod względem użytkowym.

Tabela 1. Parametry geometryczne analizowanych typów kanałów wentylacyjnych.

Przekrój poprzeczny	Kształt	Grubość ścianki	Wymiary	Pole przekroju	Średnica hydrauliczna	Moment bezwładności I_x
		mm	mm	cm^2	mm	cm^4
Kołowy		1	ϕ320	794.23	318	1274.78
Prostokątny		1	200x400	788.04	264.44	921.40
Prostokątny z zaokrąglonymi rogami		1	200x400 R100	703.91	275.50	705.49
		1	200x400 R50	767.43	277.08	824.56

3. Parametry przepływowe

W trakcie projektowania kanałów wentylacyjnych kluczowym elementem jest odpowiedni dobór ilości powietrza jaka powinna ulec wymianie w danym pomieszczeniu, przykładowo dla schronów powinno to być od 8 do 38 m^3/h na osobę. Ten warunek definiuje objętościowe natężenie przepływu przez kanał. Powszechnie kanały dobiera się w taki sposób, aby średnia prędkość przepływu powietrza przez kanał nie była większa niż 5 m/s dla przestrzeni gdzie należy ograniczać hałas (biura, sypialnie, przestrzenie użyteczności publicznej) oraz od 7 do 10 m/s w przestrzeniach gdzie nie ma konieczności ograniczania hałasu (maszynownie, przestrzenie przemysłowe). Na podstawie wymaganego objętościowego natężenia przepływu oraz prędkości maksymalnej w kanale projektuje się instalacje wentylacyjną. Ilość wymienianego powietrza można obliczyć na podstawie norm i rozporządzeń. Natomiast prędkość powietrza w kanale wentylacyjnym oblicza się na podstawie równania ciągłości cieczy jako:

$$v_{śr} = \frac{Q}{A} \tag{2}$$

gdzie:
Q – objętościowe natężenie przepływu, m^3/h.

W przypadku obliczeń kanałów wentylacyjnych pomija się ściśliwość powietrza ze względu na niskie wartości prędkości oraz ciśnienia w instalacji. Niska wartość ciśnienia jest zachowana nawet w przypadku nadciśnienia w obiekcie równego 100 Pa, wymaganego dla schronów. Przyjmuje się, że pominięcie ściśliwości dla przepływów poniżej 1/3 Macha powoduje błąd mniejszy niż 6% (Kamionek & Harmata, 2020).

Straty w kanałach wentylacyjnych możemy rozdzielić na straty miejscowe spowodowane zmianą kierunku wypadkowej pędu w kanale oraz straty lepkościowe/liniowe spowodowane tarciem między medium a kanałem. Straty te można obliczyć z następujących zależności (w postaci spadku ciśnienia):

$$\Delta p_{liniowe} = \lambda \frac{L}{D_h} \frac{\rho v_{śr}^2}{2} \tag{3}$$

$$\Delta p_{miejscowe} = \zeta \frac{\rho v_{śr}^2}{2} \tag{4}$$

gdzie:
λ – współczynnik strat liniowych;
L – długość kanału, m;
ρ – gęstość medium roboczego, kg/m^3;
ζ – współczynnik strat miejscowych.

Zarówno współczynnik strat miejscowych oraz liniowych jest wyznaczany metodą eksperymentalną. W przypadku współczynnika strat liniowych stosuje się wzory eksperymentalne (np. wzór Blasiusa lub wzór Colebrooka-White'a) oraz wykres opracowany pierwotnie przez Nikuradsego (tzw. harfa Nikuradsego). W przypadku strat miejscowych należałoby korzystać z zależności opisanych przez I. Idelchika (Idelchik, 1987) w 1960 roku, jednak powszechnie korzysta się z uproszczonych tablic (Hendiger

et al., 2013). Analizując tablice zaprezentowane w (Hendiger et al., 2013; NucAir Technologies, 2020) można zauważyć, że najmniejszym współczynnikiem strat miejscowych charakteryzują się kanały okrągłe, następnie kanały prostokątne z zaokrąglonymi rogami, a największymi miejscowymi współczynnikami strat kanały prostokątne. Należy tu podkreślić, że obydwie publikacje (Hendiger et al., 2013; NucAir Technologies, 2020) wykorzystują uśredniony współczynnik strat miejscowych, który jest niezależny od prędkości przepływu.

Analiza współczynnika strat liniowych jest bardziej złożona. Można jednak przyjąć, że kanały okrągłe będą kanałami o najmniejszych stratach liniowych. W technice wentylacyjnej do wyznaczania współczynnika strat liniowych stosuje się najczęściej wzór Colebrooka-White'a:

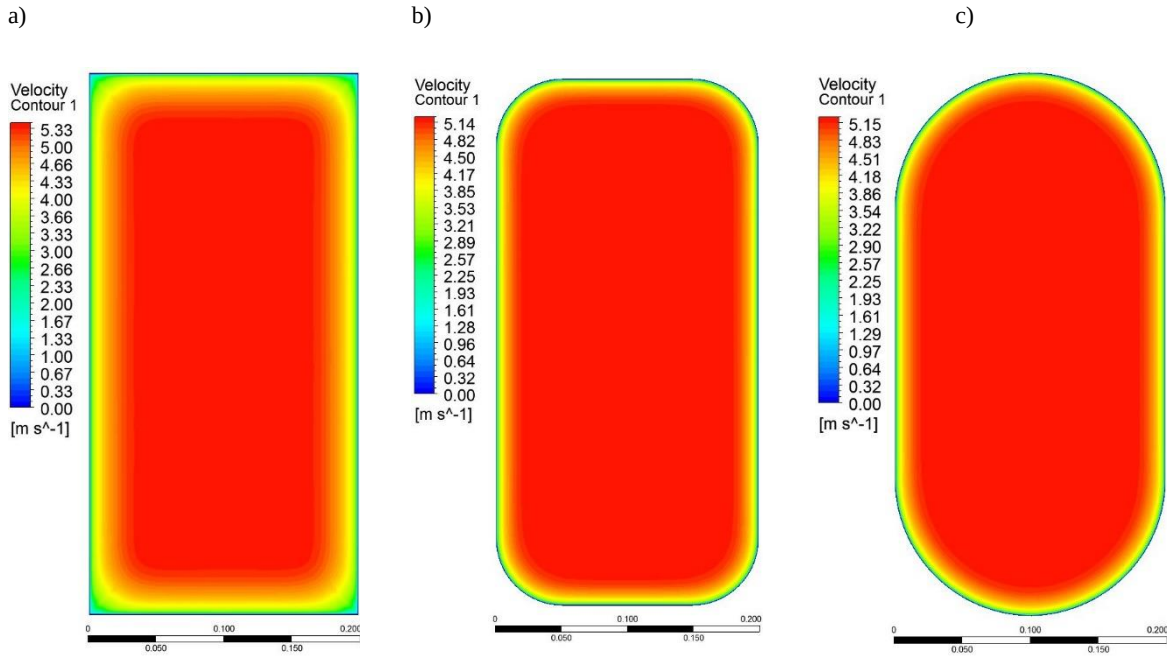
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2lg\left(\frac{2,5}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,7D_h}\right) \tag{5}$$

gdzie:
Re – liczba Reynoldsa;
k – chropowatość kanału, m;

Analiza wzoru (3) oraz (5) pokazuje, że w przypadku zastąpienia kanału prostokątnego przez kanał prostokątny z zaokrąglonymi rogami nastąpi zmniejszenie strat liniowych, o ile jednocześnie nie nastąpi zwiększenie prędkości przepływu związane z zmniejszeniem przekroju poprzecznego kanału (Tabela 1). W rzeczywistym układzie, w którym należy zapewnić odpowiednią wymianę powietrza w wentylowanym obiekcie; zmiana kanału z prostokątnego na prostokątny z zaokrąglonymi rogami spowoduje zwiększenie prędkości średniej powietrza. To wpłynie na zwiększenie liczby Reynoldsa, co w konsekwencji doprowadzi do zwiększenia strat liniowych. Przedstawiony przypadek ma zastosowanie dla kanałów o niewielkich średnicach hydraulicznych, gdzie wprowadzenie zaokrągleń do kanału powoduje znaczącą zmianę pola przekroju, jak w przypadku pokazanym w Tabeli 1. Problem strat liniowych w kanałach prostokątnych z zaokrąglonymi rogami omówiono również w (Peszynski, 2019; Peszynski et al., 2019).

Na rys. 3 pokazano kontury prędkości w kanale o przekroju prostokątnym oraz prostokątnym z zaokrąglonymi narożnikami. Analiza tych konturów pozwala zauważyć dwie zalety kanałów o przekroju prostokątnym z zaokrąglonymi rogami.

1. Prędkości maksymalne w przekrojach z zaokrąglonymi rogami są niższe niż w przypadku kanałów prostokątnych. W przypadku badań przedstawionych przez Peszynski et al. (2019) różnica pomiędzy prędkością maksymalną dla kanału prostokątnego oraz prostokątnego z zaokrąglonymi rogami wynosiła 0,04 m/s dla kanału 500x800 R100. Problem rozkładu prędkości w kanałach prostokątnych z zaokrąglonymi brzegami omówiono szerzej w (Peszyński & Mrozik, 2020; Peszynski & Tesař, 2020).
2. Prędkość w narożnikach kanałów o przekroju prostokątnym jest niewielka co może powodować osadzanie się w nich pyłów i innych zanieczyszczeń. Miejsca takie mogą być siedliskiem bakterii i grzybów groźnych dla ludzkiego zdrowia, co generuje konieczność regularnej dekontaminacji. Powszechnie do czyszczenia kanałów stosuje się tak zwaną świnię, która może być wykonana z lodu (Quarini, 2002) i stosowana w każdym kanale, jednak częściej przyjmuje formę specjalnego urządzenia (Chen et al., 2020) i w takim przypadku dostosowana jest do konkretnego kanału pod względem wielkości i kształtu. W przypadku kanałów prostokątnych zastosowanie klasycznej świni jest utrudnione, co spowodowane jest narożnikami kanału oraz trudnością jaką jest dokładne ich wyczyszczenie. Zastosowanie kanałów prostokątnych z zaokrąglonymi brzegami niweluje ten problem.



Rys. 3. Kontur prędkości w kanale o przekroju prostokątnym 200x400 (a), prostokątnym z zaokrąglonymi rogami 200x400 R50 (b) i 200x400 R100 (c) dla średniej prędkości 5 m/s.

4. Parametry wytrzymałościowe

Kanały wentylacyjne poddawane są zasadniczo dwóm rodzajom naprężeń: naprężeniom gnącym spowodowanym ciężarem własnym oraz naprężeniom południkowym i obwodowym (zgodnie z teorią błonową) spowodowanym nadciśnieniem w środku kanałów. Warto zaznaczyć, że pod tym względem kanały okrągłe i prostokątne z zaokrąglonymi rogami wykazują się większą wytrzymałością, co związane jest z mniejszą odległością ścianki od środka geometrycznego kanału. Jest to szczególnie widoczne w trakcie pomiarów odkształcenia ścianki w przypadku poddania kanału nadciśnieniu, gdy ścianki kanału prostokątnego odkształcają się znacznie bardziej niż ścianki kanału prostokątnego z zaokrąglonymi brzegami w trakcie testu szczelności. Przykład realizacji takich pomiarów został przedstawiony na rys. 4. Wytrzymałość kanału na odkształcenia spowodowane nadciśnieniem jest szczególnie ważna w kanałach wentylacyjnych w schronach z powodu możliwości wystąpienia wybuchu w kanale lub zwiększenia się ciśnienia w kanale spowodowanego falą uderzeniową. Nie znaleziono jednak artykułów, które umożliwiłyby przeprowadzenie takiej analizy dla omawianych kanałów.

Rys. 4. Kanały podczas pomiarów szczelności i odkształcenia się ścianek kanałów (zasoby własne).

Jeżeli chodzi zaś o naprężenia gnące, a dokładniej podatność kanału na ugięcie, to należy zauważyć, że kanały wentylacyjne w pewnym uproszczeniu mogą być traktowane jako belki o jednorodnym przekroju. Natomiast ugięcie belki zależne jest odwrotnie proporcjonalnie do wartości momentu bezwładności I_x, który został przedstawiony w Tabeli 1. Kanały prostokątne i prostokątne z zaokrąglonymi rogami charakteryzują się mniejszym momentem bezwładności niż kanały okrągłe i moment ten będzie się zmniejszał wraz z zwiększaniem promienia zaokrąglenia. W skrajnych przypadkach może to spowodować konieczność zastosowania większejliczby zamocowań kanału, tak aby w ten sposób zapobiegać jego nadmiernemu ugięciu.

5. Wnioski

Analizując wszystkie przytoczone fakty należy zauważyć, że w instalacji schronowej najbardziej korzystne, ze względów eksploatacyjnych oraz wytrzymałościowych, jest stosowanie kanałów okrągłych. Ich kształt charakteryzuje się największą wytrzymałością na obciążenie spowodowane ciśnieniem wewnętrznym, a straty ciśnienia w tych kanałach są najmniejsze. Jednakże uwzględniając kwestie ekonomiczne zasadność stosowania kanałów okrągłych sprowadza się do przypadków budowy nowych schronów lub dostosowywania budynków pod schrony przez służby wojskowe. Jednak Szafrański (2010, 2012) zwraca uwagę na konieczność przystosowywania istniejących budynków, np. mieszkalnych, do pełnienia funkcji schronów przez gminy, wspólnoty mieszkaniowe, albo prywatnych właścicieli. W takim przypadku stosowanie kanałów okrągłych zwiększa niepotrzebnie koszty, o czym wspomniano na wstępie, wymuszając tym samym zastosowanie kanałów prostokątnych lub prostokątnych z zaokrąglonymi narożnikami. Zdaniem autorów niniejszej publikacji korzystniejsze, ze względu na eksploatacje schronu, jest korzystanie z kanałów prostokątnych z zaokrąglonymi rogami, które mogą generować wyższe straty ciśnienia (straty liniowe - w przypadku niewielkich kanałów stosowanych najczęściej), ale jednocześnie mogą zapewniać lepsze parametry wytrzymałościowe (konieczne są dalsze badania) oraz są łatwiejsze do czyszczenia w przypadku ich zanieczyszczenia, spowodowanego zarówno osadzaniem się kurzu, jak i potencjalnego zanieczyszczenia radiacyjnego. Należy przy tym zauważyć, że kanały prostokątne z zaokrąglonymi rogami nie są tak powszechnie dostępne na rynku jak kanały prostokątne.

Pomimo, że nie da się obiektywnie i jednoznacznie wskazać zastosowanie których kanałów jest korzystniejsze ekonomicznie to zdaniem autorów zaznaczone w niniejszej publikacji problemy są ciekawe, warte podkreślenia i wymagają dalszych badań.

6. Podsumowanie

W pracy zaprezentowano trzy kształty kanałów wentylacyjnych stosowanych w przemyśle: kanały o przekroju okrągłym, kanały o przekroju prostokątnym oraz kanały o przekroju prostokątnym z zaokrąglonymi rogami. Przeanalizowano parametry przepływowe oraz wytrzymałościowe wskazanych kanałów, jak również przedstawiono wady i zalety poszczególnych kształtów kanałów. W ramach podsumowania należy podkreślić poniższe fakty:

(1) Kanały okrągłe, mimo iż charakteryzują się największą wytrzymałością oraz najmniejszymi generowanymi stratami ciśnienia, są wysokie w stosunku do innych typów kanałów. Wyklucza to ich zastosowanie w przypadku kondygnacji o niewielkiej wysokości. Zastosowanie takich kanałów wymusza projektowanie wyższych stropów zwiększając tym samym koszt inwestycji. W przypadku adaptacji istniejących budowli na potrzeby schronów zastosowanie tych kanałów znacznie ogranicza wysokość pomieszczenia.

(2) Kanały prostokątne charakteryzują się największymi współczynnikami strat, jednak generują niższe straty ciśnień niż kanały prostokątne z zaokrąglonymi brzegami (w przypadku niewielkich, a zarazem najczęściej stosowanych przekrojów) co spowodowane jest przez wzrost prędkości średniej wynikający z różnicy pól przekrojów poszczególnych kanałów. Prędkości w rogach kanału są niewielkie, co potencjalnie może powodować osadzanie się tam zanieczyszczeń. Rogi w kanałach są miejscami trudnymi do dokładnego wyczyszczenia.

(3) Kanały prostokątne z zaokrąglonymi rogami generują większe straty ciśnień niż kanały prostokątne (w przypadku niewielkich, a zarazem najczęściej stosowanych przekrojów) lub okrągłe. Łączą jednak zalety kanałów okrągłych (potencjalnie wysoka wytrzymałość na wybuch wewnątrz kanału) i prostokątnych (niewielka wysokość).

Do badań jakie należy przeprowadzić w celu uzupełnienia luk należą: badania wpływu współczynnika kształtu na parametry przepływowe oraz wytrzymałościowe kanału, porównanie parametrów wytrzymałościowych kanałów prostokątnych i prostokątnych z zaokrąglonymi rogami, optymalizacja promienia zaokrąglenia kanału prostokątnego z zaokrąglonymi rogami pod względem przepływowym i wytrzymałościowym.

Bibliografia

Averkova, O. A., Zorya, V. Y., Logachev, I. N., & Logachev, K. I. (2010). Numerical simulation of air currents at the inlet to slot leaks of ventilation shelters. *Refractories and Industrial Ceramics*, *51*(3), 177–182. https://doi.org/10.1007/s11148-010-9284-7

Baryłka, A., & Baryłka, J. (2012). Uregulowania prawne dotyczące ochrony ludności kraju z uwzględnieniem schronów i ukryć. In Z. Mierczyk & J. Wasilczuk (Eds.), *XXVI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „EKOMILITARIS-2012"* (pp. 45–60). Wyd. WAT.

Chen, J., He, L., Luo, X., Lu, L., Zhang, H., Li, X., Liu, H., & He, S. (2020). Bypass pigging technology on amelioration of pigging-induced liquid flow: An experimental and modelling study. *Ocean Engineering*, *198*(December 2019), 106974. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106974

Harmata, W., Szcześniak, Z., & Sobiech, M. (2017). Collective protection against contamination. *Bulletin of the Military University of Technology*, *66*(1), 153–167. https://doi.org/10.5604/01.3001.0009.9503

Hendiger, J., Ziętek, P., & Chlidzinska, M. (2013). *Wentylacja i klimatyzacja. Materiały pomocnicze do projektowania*. Venture Industries Sp. z.o.o.

Idelchik, I. E. (1987). Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd Edition. *Journal of Pressure Vessel Technology*, *109*(2), 260–261. https://doi.org/10.1115/1.3264907

Kamionek, D., & Harmata, W. (2020). Filtering and ventilation installations for permanent objects of protection against contamination. *Bulletin of the Military University of Technology*, *69*(2), 93–115. https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5638

Kwiatkowski, P. (2012). Uregulowania prawne dotyczące ochrony ludności kraju na wypadek zaistnienia sytuacji kryzysowych z uwzględnieniem schronów i ukryć. In Z. Mierczyk & J. Wasilczuk (Eds.), *XXVI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „EKOMILITARIS-2012"* (pp. 371–339). Wyd. WAT.

Logachev, K. I., Khodakov, I. V., & Averkova, O. A. (2015). Decreasing the Power Requirements of Ventilation Shelters Through Aerodynamic Screening of Slot Leakages. *Refractories and Industrial Ceramics*, *56*(2), 204–209. https://doi.org/10.1007/s11148-015-9814-4

Logachev, K. I., Kryukov, I. V., & Averkova, O. A. (2015). Simulation of air flows in ventilation shelters with recirculation. *Refractories and Industrial Ceramics*, *56*(4), 428–434. https://doi.org/10.1007/s11148-015-9861-x

Mukhtar, A., Ng, K. C., & Yusoff, M. Z. (2017). Development and Validation of the CFD Model for Natural Ventilation of Underground Shelter. *Science International Journal*, *29*(2), 521–525.

Mukhtar, A., Yusoff, M. Z., Ng, K. C., & Nasir, M. F. M. (2018). Application of Box-Behnken design with response surface to optimize ventilation system in underground shelter. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *52*(2), 161–173.

NucAir Technologies. (2020). *Squoval Welded Ductwork*. https://nucair.eu/pliki/catalogue_sq-100_squoval_ductwork.pdf

Ovsyannikov, Y. G., Gol'Tsov, A. B., Seminenko, A. S., Logachev, K. I., & Uvarov, V. A. (2017). Reducing the power consumption of ventilation systems through forced recirculation. *Refractories and Industrial Ceramics*, *57*(5), 557–561. https://doi.org/10.1007/s11148-017-0022-2

Peszynski, K. (2019). Linear Pressure Losses Coefficients in a New Ventilation System. *Engineering Mechanics 2019*, 279–282. https://doi.org/10.21495/71-0-279

Peszyński, K., & Mrozik, D. (2020). Numerical Verification of Velocity Distribution Models in a Selected Ventilation Duct. *Engineering Mechanics 2020*, *26*, 408–411. https://doi.org/10.21495/5896-3-408

Peszynski, Kazimierz, & Tesař, V. (2020). Algebraic model of turbulent flow in ducts of rectangular cross-section with rounded corners. *Flow Measurement and Instrumentation*, *75*(October 2019). https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101790

Peszynski, Kazimierz, Tesař, V., & Kuliś, E. (2019). Evaluation of linear losses in ventilation ducts with a rounded rectangle cross-section. *MATEC Web of Conferences*, *302*, 01021. https://doi.org/10.1051/matecconf/201930201021

Quarini, J. (2002). Ice-pigging to reduce and remove fouling and to achieve clean-in-place. *Applied Thermal Engineering*, *22*(7), 747–753. https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00019-4

Szafrański, M. (2010). Prawne problemy związane z budownictwem schronowym obrony cywilnej. *XXIV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „EKOMILITARIS- 2010"*, 1–5.

Szafrański, M. (2012). Propozycje zasad utrzymania i finansowania budowli schronowych obrony cywilnej. In Z. Mierczyk & J. Wasilczuk (Eds.), *XXVI Międzynarodowa Konferencja naukowo-techniczna, EKOMILITARIS 2012* (pp. 1–9). Wyd. WAT.

Szcześniak, Z., Kwiatkowski, P., & Szafrański, M. (2017). Najnowsze projekty rozwiązań prawnych w zakresie budownictwa schronowego. *XXXI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „EKOMILITARIS-2017"*, 1–23.

Szcześniak, Z., Mierczyk, Z., Zygmunt, M., Wasilczuk, J., Wrzesień, S., Bąk, G., Frant, M., Gietka, A., Kynsak, P., Onopiuk, S., Pieńko, B., Piotrowski, W., Rekulcki, R., Skrodzki, C., & Stolarski, A. (2010). Automatyczny zawór przeciwwybuchowy nowej generacji. *XXIV Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „EKOMILITARIS- 2010"*, 384–391.

Wasilczuk, J. (2017). Zagrożenia występujące w funkcjonowaniu schronowych instalacji wentylacyjnych. *Modern Engineering*, *1*, 54–60.

Wasilczuk, J. (2019). Threats occurring in the functioning of shelter ventilation installations. *Modern Engineering*, *2*, 55–60.