PRZEGLĄD KONSTRUKCJI WIRNIKÓW POMP ŚCIEKOWYCH

mgr inż. Mikołaj Sitniewski, dr hab. inż. Janusz Skrzypacz, dr inż. Przemysław Szulc
Politechnika Wrocławska

dr inż. Marcin Janczak, dr inż. Witold Lorenz
Hydro-Vacuum Grudziądz

Istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w pompach ściekowych, które mają na celu ograniczenie tendencji do zapychania się ciałami stałymi. W artykule oceniono subiektywnie – według doświadczenia autorów – parametry eksploatacyjne wpływające na bezpieczeństwo pracy układu pompowego i właściwości energetyczne danych typów wirników. Dla ułatwienia, w porównaniu przyjęto skalę powszechnie stosowaną do oceny efektywności sprzętu AGD.

Pompy ściekowe to maszyny energetyczne, przed którymi stawiane są dwa najważniejsze wymagania: z jednej strony to wysoka sprawność energetyczna zapewniająca niski koszt eksploatacji układów odprowadzenia ścieków, a z drugiej odporność na zablokowanie przepływu ciałami stałymi znajdującymi się w pompowanym medium.

Niska energochłonność pomp i systemów pompowych to wymóg przepisów i rozporządzeń UE. Ponadto rosnąca liczba pomp używanych do transportu ścieków oraz ciągle drożejąca energia wpływają bezpośrednio na koszty transportu fekaliów od domów do oczyszczalni ścieków, oddziałując na ceny, które musimy płacić.

Znaczącym problemem eksploatacyjnym, nierzadko istotniejszym niż cena samej energii, jest zapychanie się wirnika pompy ciałami stałymi zawartymi w ściekach, co powoduje drastyczny wzrost kosztów obsługi oraz kosztów wyłączenia maszyny z eksploatacji. Szczególnie problematyczne są ciała włókniste, które wykazują wysoką tendencję do gromadzenia się na krawędziach wirnika, a zwłaszcza na krawędziach wlotowych, prowadząc w dłuższym czasie do jego całkowitego zablokowania. Przy zablokowaniu wirnika przez ciała włókniste konieczny jest demontaż pompy i ręczne ich usunięcie – co jest kosztowne i problematyczne, a w przypadku braku szybkiej reakcji może prowadzić do rozszczelnienia instalacji oraz w konsekwencji – rozlania się fekaliów.

Parametrem pozwalającym określić do pewnego stopnia odporność na zablokowanie pompy przez ciała obce jest swobodny przelot. Jego wartość definiuje się jako maksymalną średnicę kuli mogącej przedostać się przez układ hydrauliczny pompy bez zablokowania. Im wyższa jest wartość tego parametru, tym wyższa odporność pompy na występowanie ciał stałych w ściekach. Na rys. 1 pokazano dwułopatowy wirnik pompy ściekowej, w którym oznaczono swobodny przelot przez wirnik.

RYS. 1
Wirnik dwułopatowy pompy do cieczy zanieczyszczonych z kulą definiującą swobodny przelot

Przegląd wirników pomp ściekowych

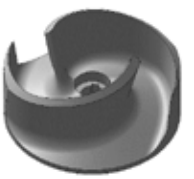
Istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w pompach ściekowych, które mają na celu ograniczenie tendencji maszyny do zapychania się ciałami stałymi. Pierwszą z konstrukcji, o jakiej warto

fot. 123rf

wspomnieć, są pompy o swobodnym przepływie z wirnikami wielołopatowymi, półotwartymi typu „Vortex" (tabela 1, pozycja 1). Wirniki tego typu charakteryzują się bardzo dobrą odpornością na zapychanie ciałami włóknistymi, a także dużą wartością swobodnego przelotu, który determinuje dobrą odporność na zablokowanie wirnika substancjami stałymi. Natomiast wadą tego typu konstrukcji jest ich wysoka energochłonność, będąca skutkiem recyrkulacji pewnej ilości cieczy między wylotem a wlotem wirnika.

Rozwinięciem konstrukcji wirnika „Vortex", mającym na celu eliminację jego wady w postaci recyrkulacji cieczy, są wirniki typu „Supervortex" (tabela 1, pozycja 2), w których zastosowano na łopatkach dodatkowe przysłony ograniczające cyrkulację cieczy pomiędzy stroną czynną i bierną łopatki, prowadząc do podwyższenia sprawności [1]. Efektywność pomp z wirnikami „Supervortex" jest jednak i tak znacząco niższa w porównaniu do sprawności osiąganych przez wirniki jednostronnie otwarte, lecz bezpośrednio współpracujące z nieruchomą tarczą, określane jako „Contrablock" (tabela 1, pozycja 3). Zastosowanie takiego rozwiązania znacząco podnosi sprawność, ponieważ niweluje jałowe krążenie cieczy i umożliwia osiągnięcie sprawności o wartościach zbliżonych do wirników zamkniętych. Dodatkowo tarcza może zostać wyposażona w rowek rozcierający i wraz z krawędziami łopatek wirników rozcierać ciała włókniste, ułatwiając samooczyszczenie wirnika. Zastosowanie małej liczby łopatek powoduje dodatkowy wzrost swobodnego przelotu, poprawiając

TAB. 1
Porównanie rozwiązań konstrukcyjnych wirników pomp ściekowych

L.p.	Konstrukcje wirników w pompach ściekowych		Ocena właściwości eksploatacyjnych wirników				Ocena końcowa
			Sprawność	Bezpieczeństwo eksploatacji			
				Swobodny przelot	Zawartość ciał włóknistych	Zawartość substancji stałych	
1.	Wielołopatkowy półotwarty (Vortex)		D	A+++	A+++	A+++	A
2.	Wielołopatkowy półotwarty z częściowo przysłoniętymi łopatkami (Supervortex)		B	A+++	A++	A++	A
3.	Dwułopatowy półotwarty z tarczą rozcierającą w układzie „Contrablock"		A++	A++	A+	A++	A++
4.	Jednołopatowy półotwarty z tarczą rozcierającą w układzie „Contrablock"		A++	A+++	A++	A	A+++
5.	Jednołopatowy zamknięty		A+++	A+++	A+	A+	A+++

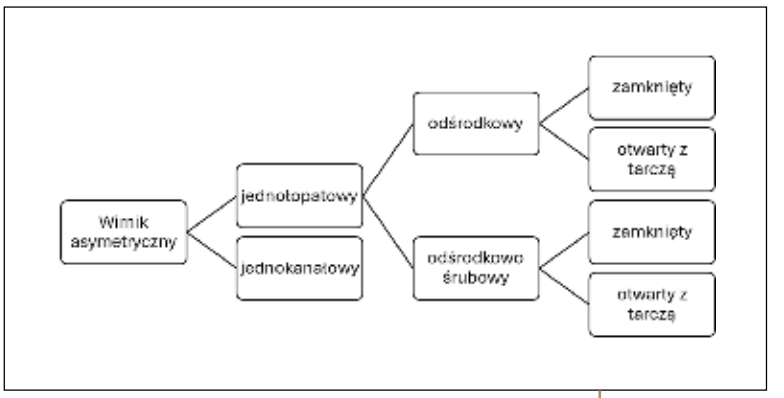
odporność eksploatacyjną pompy na zablokowanie wirnika ciałami obcymi.

W tej grupie pomp na wyróżnienie zasługują wirniki dwu- i jednołopatowe. Zastosowanie dwóch łopatek ogranicza częściowo wartość swobodnego przelotu w odniesieniu do wirników jednołopatowych, jednakże to rozwiązanie zachowuje symetryczność geometryczną i przepływu przez wirnik, co skutkuje również większą symetrią sił w nim występujących. Prowadzi to do uproszczenia metodologii konstruowania, a także bardziej równomiernego zużywania się wirnika na skutek ścierania, co sprawia, że tego typu pompy są tańsze i łatwiejsze w eksploatacji. Zwiększenie przelotu swobodnego poprzez zastosowanie wirnika jednołopatowego jest szczególnie istotne w przypadku pomp o niskiej wydajności. Rozwiązanie to pozwala, przy zachowaniu dużej wartości swobodnego przelotu, znacząco przesunąć punkt optymalny w kierunku niższej wydajności. Zastosowanie jednej łopatki powoduje dodatkowo asymetryczny przepływ na wlocie do wirnika, co korzystnie minimalizuje prawdopodobieństwo zaczepiania się ciał włóknistych w jego środkowej strefie, w pobliżu osadzenia na wale.

Porównanie różnych konstrukcji wirników przedstawiono w tabeli 1, w której oceniono subiektywnie – według doświadczenia autorów – parametry eksploatacyjne wpływające na bezpieczeństwo pracy układu pompowego i właściwości energetyczne danych typów wirników. Dla ułatwienia, w porównaniu przyjęto skalę powszechnie stosowaną do oceny efektywności sprzętu AGD. W analizie pominięto wirnik z nożem tnącym, ponieważ jego zastosowanie w zasadzie ogranicza się do aplikacji w indywidulnych, a nie zbiorczych systemach kanalizacyjnych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że wirniki jednołopatowe w układzie „Contrablock" stanowią jedno z najlepszych rozwiązań do stosowania w pompach ściekowych. W szczególności dotyczy to pomp o wydajności powyżej 100 m³/h, dla których możliwe staje się pogodzenie swobodnego przelotu o wartości większej niż 80 mm z wymaganą wydajnością i odpowiednio wysoką sprawnością (ponad 70% – w zależności od parametrów przepływowych pompy). Równie dobrym wyborem są wirniki dwułopatowe, o nieco mniejszym przelocie, ale z dużo większą trwałością, szczególnie w długoterminowej eksploatacji przy pracy z wysokimi wydajnościami (ze względu na równomierne zużywanie ścierne wirnika).

W systemach kanalizacyjnych o niskich wartościach przepływów w zasadzie najlepiej się sprawdzają pompy z wirnikami „Supervortex", które w przeciwieństwie do wirników jednołopatowych bez problemu zachowują wymaganą wartość swobodnego przelotu. Niska sprawność tych pomp (do ~50%) może być zaakceptowana ze względu na małą moc tych pomp i ich cykliczną pracę. Dla takich instalacji kanalizacyjnych zdecydowanym priorytetem jest niezawodność pracy, co dodatkowo usprawiedliwia stosowanie pomp mniej sprawach, ale o większej niezawodności i pewności działania. W przypadku układów o dużej mocy lub często załączanych zaleca się zmianę systemu pompowania ścieków z pompowni mokrej na tłocznie ścieków z separacją ciał stałych. Takie rozwiązanie, dzięki chwilowej separacji, umożliwia stosowanie wysokosprawnych pomp z wirnikami wielołopatowymi o niskich przelotach już dla wydajności kilkunastu m³/h, a dodatkowo powoduje zmniejszenie uciążliwości eksploatacji, jak i wpływu obiektu na otaczające środowisko.



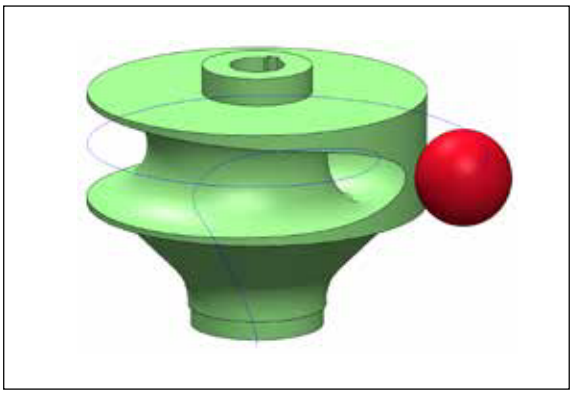
RYS. 2
Podział wirników asymetrycznych

> Znaczącym problemem eksploatacyjnym, nierzadko istotniejszym niż cena samej energii, jest zapychanie się wirnika pompy ciałami stałymi zawartymi w ściekach

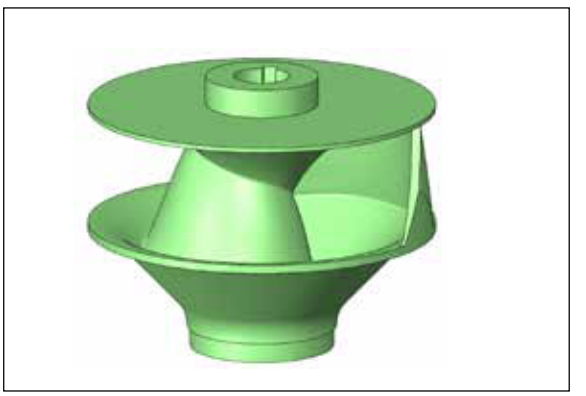
Charakterystyka wirników asymetrycznych

W związku z licznymi zaletami wirników jednołopatowych i jednokanałowych ocenia się, że będą to jedne z najbardziej rozwijanych konstrukcji w najbliższych latach. Oba rozwiązania łączy wspólna cecha w postaci asymetrycznej konstrukcji układu przepływowego wirnika i takiego samego charakteru problemów eksploatacyjnych. Ze względu na wyżej wymienione podobieństwa, w dalszej części artykułu wprowadzono wspólną nazwę dla obu rozwiązań w postaci „wirników asymetrycznych".

Na rys. 2 pokazano podział wirników asymetrycznych, spośród których można wyróżnić: wirniki jednołopatowe i jednokanałowe, przedstawione na rys. 3. i 4. Jednołopatowe podzielimy z kolei na wirniki odśrodkowe i odśrodkowo-śrubowe. Mogą one występować w wersji zamkniętej lub półotwartej z tarczą rozcierającą. Wirniki jednokanałowe charakteryzują się tym, że w wirniku w postaci dysku wycięty jest kanał o zadanym kształcie geometrycznym.



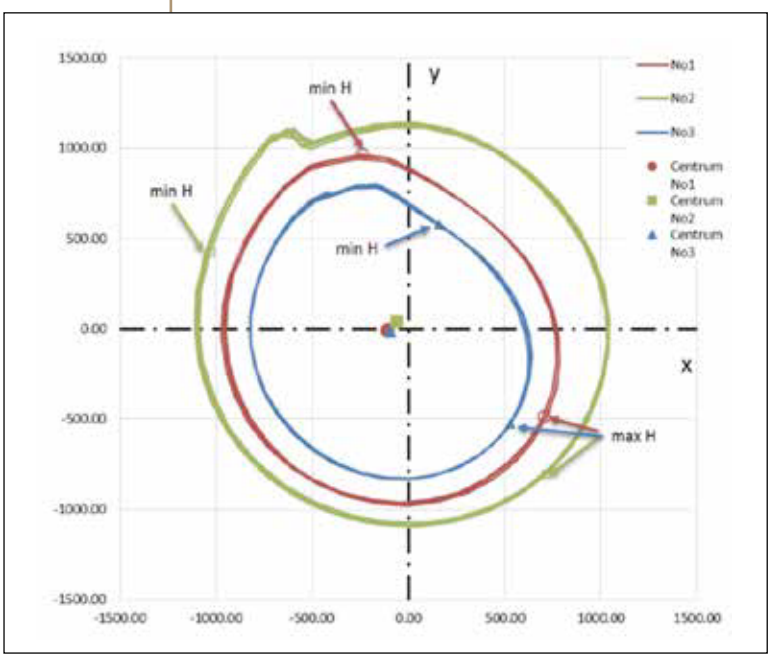
RYS. 3 Przykładowy wirnik jednokanałowy



RYS. 4 Przykładowy wirnik jednołopatowy

Pomimo licznych zalet wirników jednołopatowych i jednokanałowych, ich asymetryczność powoduje następujące problemy z wyważaniem:

- hydraulicznym wirnika pracującego w cieczy, na skutek występującej wysokiej wartości siły promieniowej, która dodatkowo zmienia się podczas obrotu wirnika,
- dynamicznym wirnika w powietrzu, na skutek asymetrii geometrycznej konstrukcji, powodującej przesunięcie środka ciężkości poza oś obrotu.



RYS. 5 Obliczone siły promieniowe różnych wirników asymetrycznych w zależności od kąta obrotu [2]

Asymetryczność analizowanych konstrukcji jest przyczyną dużej zmienności ciśnień na obwodzie wirnika, co wpływa na wartość siły promieniowej, której kierunek dodatkowo zmienia się podczas obrotu wirnika [2]. Na rys. 5 pokazano obliczoną drogą symulacji numerycznych CFD wartość siły promieniowej dla trzech badanych wirników (1,3 – wirnik jednołopatowy, 2 – wirnik jednokanałowy), która zmienia się w funkcji obrotu wirnika. Środki sił hydrodynamicznych są przesunięte względem środka obrotu, co powoduje, że siły promieniowe nie pozostają w równowadze.

Wysokie wartości siły promieniowej o zmiennym kierunku powodują drgania pompy, a także problemy z wytrzymałością zmęczeniową jej komponentów, przede wszystkim wału, łożysk i uszczelnień czołowych.

Wyzwaniem podczas projektowania pomp z wirnikami asymetrycznymi jest minimalizacja tych zjawisk, aby zachować dobry stan dynamiczny maszyny w określonym polu pracy. Nie bez znaczenia pozostaje również rozłożenie masy obracającego się wirnika. Środek ciężkości wirnika asymetrycznego, już ze względu na jego budowę, nie znajduje się w jego osi obrotu. Środek masy może być przesunięty do osi poprzez zwiększenie grubości tarczy tylnej wirnika w określonym miejscu, co jest dobrze widoczne na wirniku S-TUBE na fot. 4 w dalszej części artykułu.

Wirująca hydrauliczna siła promieniowa oraz siła wynikająca z braku wyważenia wirnika mają podobny charakter – zmienny kierunek w czasie, powiązany z częstością kątową wirowania wału. Z tego względu zmienna część siły promieniowej w literaturze [3] jest określana jako „niewyważenie hydrauliczne". Istnieją badania, które potwierdzają możliwość zmniejszania siły promieniowej za pomocą przesunięcia środka ciężkości wirnika za pomocą dodania/ujęcia masy korekcyjnej, w określonym kierunku [4]. Warto zauważyć, że w przypadku próby kompensacji sił promieniowych z użyciem masy korekcyjnej przesuwającej środek ciężkości, bezcelowe jest jego wyważanie dynamiczne w powietrzu, które powszechnie wykorzystuje się w trakcie procesu produkcji konwencjonalnych wirników wielołopatowych.

Zużycie ścierne

Kolejnym zagadnieniem wpływającym na trudność wyważenia wirników asymetrycznych jest zjawisko zużycia ściernego, którego przykłady można zobaczyć na fot. 1 i 2. Problem dotyczy głównie pompowni ogólnospławnych, narażonych na dostawnie się do cieczy dużej ilości piasku i drobnych kamieni. Powoduje to, że w dość krótkim czasie zachodzą procesy zużycia erozyjnego krawędzi wlotowej i wylotowej łopatek oraz całego kanału międzyłopatkowego wirnika.

Zużycie ścierne w wirnikach wielołopatkowych jest symetryczne względem osi obrotu i powoduje zbliżone zużycie każdej łopaty, co częściowo ogranicza zmianę środka masy wirnika i wpływa w minimalnym stopniu na zmianę stanu dynamicznego pompy. Zużycie erozyjne występujące w wirniku z jedną łopatką (kanałem) powoduje asymetryczne ubytki materiału, co może w dość szybkim czasie skutkować utratą odpowiedniego wyważenia, podwyższając znacząco drgania pompy.

Z punktu widzenia parametrów dynamicznych problemem jest również korekta parametrów hydraulicznych wirników asymetrycznych poprzez stoczenie średnicy zewnętrznej. W przypadku tych konstrukcji zmiana wymiaru średnicy zewnętrznej wirnika wiąże się ze zmianami rozkładu masy, a także zmianami w przepływie cieczy przez wirnik, wpływającymi na stan dynamiczny maszyny. Jest to więc zabieg wysoce niezalecany w przypadku takich konstrukcji. Rozwiązaniem może być posiadanie w ofercie osobno projektowanych wirników o kilku średnicach, co powoduje jednak wyższe koszty ze względu na konieczność projektowania i produkcji większej liczby różnych wirników. Z tego względu najlepszym sposobem dostosowania parametrów hydraulicznych pompy do wymagań układu jest zastosowanie przemiennika częstotliwości, co niestety wiąże się z większymi kosztami inwestycyjnymi oraz koniecznością przewymiarowania silnika napędowego.

> W systemach kanalizacyjnych o niskich wartościach przepływów w zasadzie najlepiej się sprawdzają pompy z wirnikami Supervortex

FOT. 1
Asymetryczne zużycie wirnika jednołopatowego poprzez degradację krawędzi wlotowej łopatki

FOT. 2
Asymetryczne zużycie wirnika jednołopatowego poprzez całkowite przetarcie łopatki

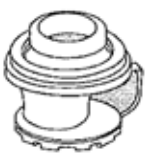
Przegląd konstrukcji pomp z wirnikami asymetrycznymi

Pomimo przedstawionych problemów konstrukcyjno-eksploatacyjnych relacja pomiędzy skutecznością i energooszczędnością wirników asymetrycznych w porównaniu do innych rozwiązań jest bardzo wysoka. Z tego względu wciąż rozwijane są konstrukcje tego typu. Na rynku można znaleźć co najmniej kilku producentów pomp ściekowych oferujących je z takimi wirnikami. Z przedstawionych w tabeli 2 na uwagę zasługują trzy rozwiązania firm: Hidrostal, Sulzer i Grundfos.

Firma Sulzer produkuje pompy z wirnikami jednołopatowymi, wyposażone w nieruchomą tarczę tylną z regulowaną szczeliną o nazwie handlowej Contrablock Plus (CB Plus). Jest to klasyczny wirnik jednołopatowy odśrodkowy z krawędzią wlotową o dużym promieniu zaokrąglenia. Pompę z wirnikiem jednołopatowym firmy Sulzer wykorzystano podczas numerycznych badań wpływu wielkości szczeliny na parametry pompy [5]. Udowodniono, że wraz ze zwiększaniem szczeliny wymagana moc mechaniczna pompy spada, lecz wiąże się to z dużym spadkiem sprawności. Przykład ten pokazuje, jak ważną kwestią jest regulacja szczeliny pomiędzy wirnikiem a tarczą korpusu podczas całego cyklu życia pompy.

Hidrostal produkuje wirniki jednołopatowe zamknięte i półotwarte z tarczą rozcierającą podobnie jak Sulzer. W pompach Hidrostal krawędź wlotowa wraz ze zbliżaniem do tarczy przedniej wysuwa się mocno do przodu, tak jak jest to widoczne na grafice w tabeli 2. Wirniki tego producenta można podzielić na dwie sekcje: śrubową i odśrodkową. Pompy te nie tylko są opisywane jako odporne na zapychanie, ale również umożliwiające pompowanie delikatnych elementów bez ich uszkodzenia (np. ryby). Hidrostal, wraz z wirnikami jednołopatowymi, stosuje elementy

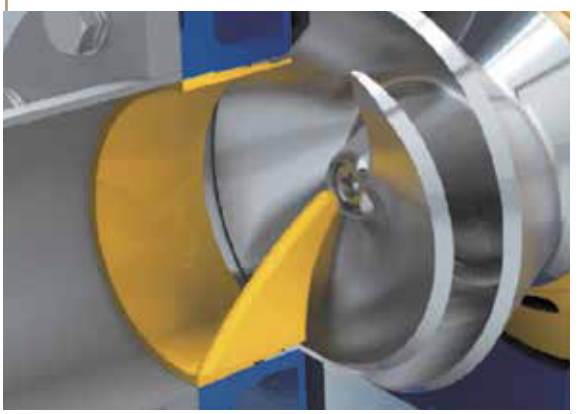
TAB. 2
Zestawienie wirników asymetrycznych różnych producentów

Producent	Wirnik	Typ wirnika
Sulzer		Wirnik jednołopatowy półotwarty [5]
Hidrostal		Wirnik jednołopatowy półotwarty [6]
Grundfos		Wirnik jednokanałowy zamknięty S-TUBE [7]
DAB		Wirnik jednołopatowy zamknięty FKC [8]
		Wirnik jednokanałowy FEKA 6000 [8]
KSB		Wirnik jednokanałowy E/E-max [9]
		Wirnik jednołopatowy półotwarty D [9]
KFP Białogon		Wirnik jednołopatowy zamknięty RPX [10]
Flygt		Wirnik C [11]

w kształcie płetwy rekina przed wlotem do pompy (fot. 3), na króćcu ssawnym. Ma ona na celu zapewnienie odpowiedniej drogi ciał stałych występujących w ściekach i zepchnięcie ich z środka wirnika, zapobiegając odkładaniu się ciał włóknistych na jego krawędzi wlotowej.

Wirnik S-TUBE firmy Grundfos jest jednokanałowy, pozbawiony ostrych krawędzi, wyposażony w jeden kanał stworzony poprzez wycięcie w pełnym wirniku kanału za pomocą kuli po określonej ścieżce. Pewną zaletą takich wirników jest odporność na uderzenia dużych, twardych ciał stałych, które mogą wyłamać łopatkę wirników jednołopatowych. Do innych zalet, jakie wymienia producent, należą: wysoka sprawność przy szerokim zakresie wydajności [7]. Podobne zachowanie zostało udowodnione w badaniach przeprowadzonych na Politechnice Wrocławskiej [2], w których porównano konstrukcje jednołopatowe i jednokanałowe. Wirnik jednokanałowy faktycznie osiągnął podobną, wysoką sprawność w szerszym zakresie wydajności w stosunku do wirników jednołopatowych, jednakże wiązało się to z uzyskaniem

FOT. 3
Płetwa rekina przed wlotem do pompy – Hidrostal [5]



FOT. 4
Tarcza tylna od strony zewnętrznej wirnika S-TUBE

relatywnie największej wartości siły promieniowej. Pozostałe zalety wymieniane przez producenta to duży swobodny przelot, niskie drgania, a także brak mechanizmu przecinania elementów włóknistych, który z czasem może powodować zużycie wirnika [7].

Na fot. 4 przedstawiono widok tarczy tylnej wirnika S-TUBE do strony zewnętrznej. By zapewnić jego odpowiednie wyważenie konieczne jest specjalne ukształtowanie tej części konstrukcyjnej poprzez utworzenie wnęk o znacznej głębokości. Znane są przypadki, w których następowało odkładanie się części stałych w tych miejscach, co prowadziło do znacznego wzrostu niewyważenia zespołu wirującego.

***

W świetle przytoczonych informacji wirniki asymetryczne (jednołopatowe i jednokanałowe) z wielu względów mogą stanowić najlepszy sposób na transportowanie fekaliów, biorąc pod uwagę kompromis pomiędzy niezawodnością a efektywnością energetyczną. Jednocześnie dla producentów pomp stanowią duże wyzwanie konstrukcyjne, a tylko prawidłowo wykonane mogą zapewniać wieloletnią i bezawaryjną eksploatację. Jednym z problemów występujących w wirnikach asymetrycznych jest duża, zmienna siła promieniowa, która dodatkowo wzrasta wraz ze wzrostem wysokości podnoszenia pompy (obniżeniem wyróżnika szybkobieżności pompy). W związku z tym nadal rzadko spotyka się te konstrukcje w aplikacjach, gdzie wymagane jest wysokie ciśnienie i względnie nieduże wydajności.

Literatura

[1] Rokita J., Ptaszek G., Stach T., Parametry pracy pomp o swobodnym przepływie z wirnikami dwułopatkowymi, Pompy Pompownie, 4, 2005, 44-47.
[2] Szulc P., Moliński G., Moloshnyi O., The influence of the impeller construction on the performance of one channel pump, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1741, no. 1, 2021, pp. 012-016.
[3] Guelich J., Jud W., Hughes S., Review of Parameters Influencing Hydraulic Forces on Centrifugal Impellers, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 201. 1987, 163-174, 10.1243/PIME_PROC_1987_201_021_02.
[4] Wang C., Tan L., Shi W., Chen C., Francis E., Research on Influence of Rotation Center Eccentricity on Radial Force of Single-Blade Centrifugal Pump, Water, 14, 2022 https://doi.org/10.3390/w14142252.
[5] Caruso F., Meskell C., Effect of the axial gap on the energy consumption of a single-blade wastewater pump, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 235, 2020, 10.1177/0957650920927366.
[6] Strona internetowa: guide-eau.com/fichiers/entreprise/plaquettes/871_hidrostal.pdf (data dostępu: 08.01.2024).
[7] Strona internetowa: grundfos.com/pl/learn/ecademy/all-courses/wastewater-transport/how-the-s-tube-impeller-helps-counter-the-wastewater-challengesStrona internetowa: (data dostępu: 08.01.2024).
[8] Strona internetowa: dna.dabpumps.com (data dostępu: 08.01.2024).
[9] Strona internetowa: ksb.com (data dostępu: 08.01.2024).
[10] Strona internetowa: kfp-bialogon.com.pl (data dostępu: 08.01.2024).
[11] Strona internetowa: xylem.com (data dostępu 08.01.2024). ■