

ANALIZA WSPÓŁPRACY SPRĘŻAREK RECYRKULACYJNYCH Z INSTALACJĄ SYNTEZY AMONIAKU

STRESZCZENIE

Analiza pracy wysokociśnieniowej instalacji syntezy amoniaku (500 t/dobę) pozwoliła wyciągnąć wniosek o pojawieniu się niestacjonarnych przebiegów falowych w przewodach tłoczących mieszankę syntezową do kolumny ze złożem katalitycznym. Zjawiska te pojawiały się po włączeniu jednej ze sprężarek recyrkulacyjnych. Analizując układ rurociągów i sposób ich dołączenia do sprężarek podstawowych i recyrkulacyjnych, wybrano punkty do obserwacji synchronicznych przebiegów ciśnień szybkozmiennych. Przeprowadzenie badań, w których obserwowano zachodzenie przebiegów falowych, pozwoliło zidentyfikować miejsca lokalnych rezonansów będących przyczyną obniżenia parametrów ssania, co wpłynęło negatywnie na wydajność sprężarek, a ponadto wywoływało drgania rezonansowe instalacji.

Słowa kluczowe: synteza amoniaku, gaz syntezowy, mieszanka syntezowa, sprężarki gazu syntezowego, sprężarki recyrkulacyjne mieszanki syntezowej, instalacja okołosprężarkowa

ANALYSIS OF RECIRCULATION COMPRESSORS CO-OPERATION WITH AMMONIA SYNTHESIS INSTALLATION

Analysis of work of high-pressure installation of ammonia synthesis enabled a conclusion about the appearance of unstationary wave courses in the pipes pressing synthesis mixture into the column with catalytic deposit. The phenomena appeared when one of recirculation compressors was turned on. To analyse the system of pipelines and the way of their attachment to basic and recirculation compressors some points were selected to observe synchronic course of rapid changing pressures. The research, in which the wave courses took place, was a ground to identify places of local resonance which were a cause of suction parameters devaluation. It had a negative influence upon the compressor efficiency and also resulted in resonance vibrations of the installation.

Keywords: ammonia synthesis, recirculation compressors, synthesis mixture

1. WSTĘP

Ciąg technologiczny instalacji syntezy amoniaku (500 t/dobę) w Zakładach Azotowych S.A. Tarnów-Mościce składa się z czterech sprężarek podstawowych gazu syntezowego NOUVO-PIGNONE, pracujących ze stałą częstotliwością i sprężarek recyrkulacyjnych – dwóch marki ZWICKAU oraz jednej marki BORSIG. Sprężarki recyrkulacyjne zasilane są silnikami elektrycznymi asynchronicznymi, które z natury swojego działania nie zapewniają stałej częstotliwości cykli tłoczenia. Proces syntezy amoniaku odbywa się w katalitycznej kolumnie konwertorowej znajdującej się poza halą. Instalacja syntezy amoniaku wyposażona jest także w szereg wymienników ciepła, których zadaniem, w zależności od potrzeb technologicznych, jest podnoszenie lub obniżanie temperatury mieszanki syntezowej. Sprężarki podstawowe w warunkach nominalnych sprężają gaz syntezowy od ciśnienia 2,5 MPa do ciśnienia 29,5 MPa. Gaz syntezowy składa się z 74,04% H₂, 24,74% N₂, 0,3% Ar, 0,92% CH₄. Do obiegu sprężarek recyrkulacyjnych trafia mieszanka syntezowa spod kolumny katalitycznej złożona z gazu syntezowego i amoniaku o następującym składzie: H₂ – 56,1%, N₂ – 18,97%, Ar – 4,21%, CH₄ – 10,81%, NH₃ – 9,91%.

Obsługa w trakcie eksploatacji instalacji stwierdziła występowanie nieprawidłowości, a mianowicie:

- okresowe zmniejszanie wydajności układu syntezy amoniaku,
- okresowe drgania instalacji, pojawiające się zwłaszcza poza halą, na estakadzie z zamontowaną kolumną katalityczną; drgania te nasilały się głównie przy równoległej pracy sprężarek recyrkulacyjnych: jednej ze sprężarek ZWICKAU i sprężarce BORSIG.

Zauważone nieprawidłowości, a także analiza pracy instalacji pozwalają na wysunięcie tezy, iż w instalacji mogą występować niestacjonarne zjawiska falowe powstające w wyniku przypadkowego nakładania się na siebie pulsacji o różnych częstotliwościach.

Celem potwierdzenia lub też zaprzeczenia tej teorii przeprowadzono wielogodzinne pomiary przebiegu ciśnień szybkozmiennych. Fakt, iż instalacja nie jest w pełni przygotowana do tego typu obserwacji, ogranicza możliwość instalowania czujników pomiarowych. Również utrudnieniem jest to, że sprężarki ZWICKAU nie są fabrycznie przystosowane do indykowania.

* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki; worszty@imir.agh.edu.pl

2. SPRĘŻARKI RECYRKULACYJNE W CIĄGU SYNTEZY AMONIAKU

Sprężarki recykulacyjne znajdują się w jednej hali, wspólnie ze sprężarkami gazu syntezowego NOUVO-PIGNONE. Sprężarki recykulacyjne ZWICKAU 12 i 13 są umieszczone w niewielkiej odległości od siebie, w okolicach końca rurociągów kolektorowych ssawnego i tłocznego. Sprężarka BORSIG znajduje się w odległości ok. 50 m od sprężarek ZWICKAU w kierunku znajdującej się na zewnątrz hali katalitycznej kolumny konwertorowej.

Sprężarka BORSIG jest dwucylindrowa, dwustronnego działania, wyposażona po stronie ssania i tłoczenia w sferyczne tłumiki pulsacji, po jednym tłumiku dla każdego z cylindrów. Dodatkowo po stronie ssania znajdują się filtry, a po stronie tłocznej – kryzy tłumiące usytuowane przed i za tłumikami pulsacji. Rurociąg doprowadzający mieszankę syntezową dochodzi od strony „wschodniej” sprężarki, powodując niesymetryczny układ zasilania cylindrów. Również układ rurociągów po stronie tłocznej jest niesymetryczny, gdyż punkt wspólny od obu cylindrów znajduje się od strony „wschodniej”. Sprężarkę napędza silnik elektryczny asynchroniczny o mocy ok. 1000 kW, ze znamionową prędkością obrotową 295 obr./min.

Sprężarki ZWICKAU są jednocylindrowe, dwustronnego działania, wyposażone w tłumiki pulsacji. Sprężarki są napędzane silnikami elektrycznymi asynchronicznymi ze znamionową prędkością obrotową 184 obr./min.

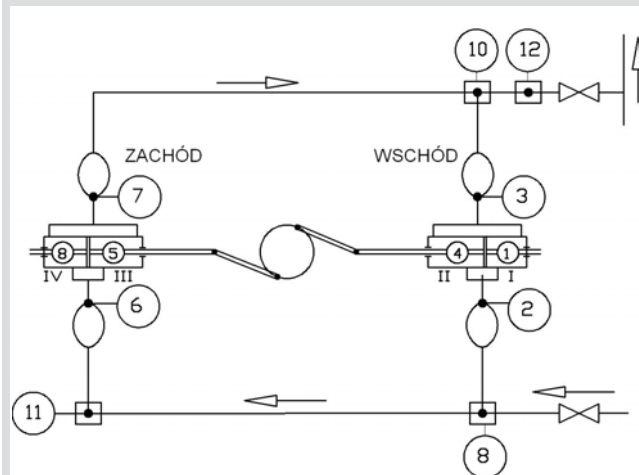
Producent sprężarki BORSIG przewidział możliwość jej indykowania, więc rozmieszczenie punktów pomiarowych nie stanowiło problemu. W przypadku sprężarek ZWICKAU możliwe jest jedynie podłączenie czujników ciśnienia po stronach tłocznych obu tych maszyn.

3. PUNKTY POMIAROWE

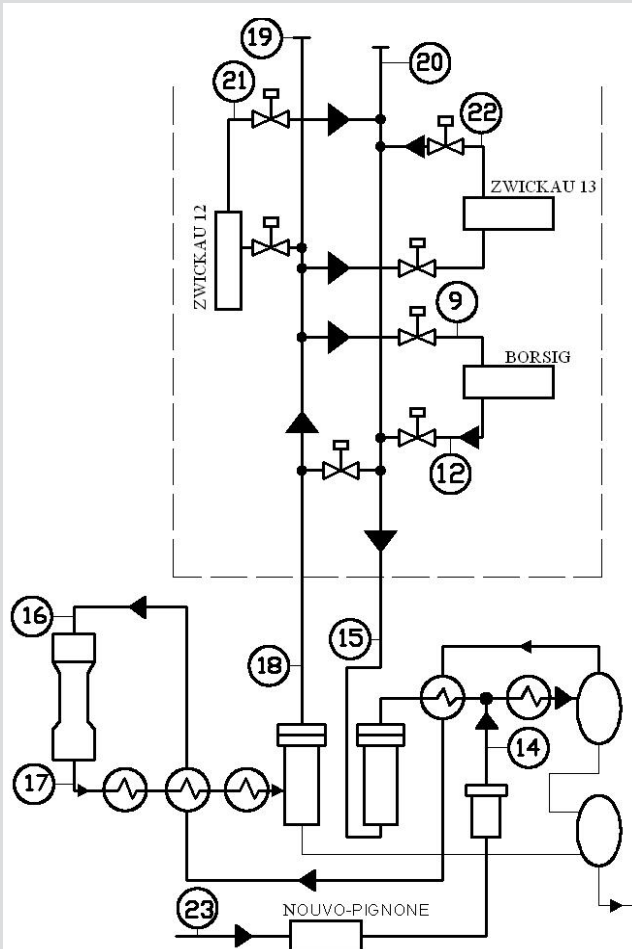
Na instalacji wytypowano punkty pomiarowe (pp), które oznaczono numerami od pp. 1 do pp. 23. Istniejące warunki pozwoliły na lokalizację punktów pomiarowych po stronie tłocznej sprężarek ZWICKAU w ich bezpośredniej bliskości (pp. 21 i pp. 22). Natomiast po stronie ssawnej takich możliwości nie było, więc z konieczności wytypowano punkt na ślepej końcówce rurociągu kolektorowego (pp. 19). Dodatkowo dla uzyskania pełnego obrazu usytuowano symetrycznie w stosunku do rurociągu ssawnego punkt (pp. 20) na kolektorze tłoczenia.

Sprężarka BORSIG jest przygotowana fabrycznie do indykacji, w związku z czym wytypowano 12 punktów pomiarowych (rys. 1), z których 8 znajduje się na sprężarce; 4 punkty pomiarowe znajdują się w przestrzeniach roboczych każdego cylindra oraz przed zaworami ssącymi i za zaworami tłocznymi obu cylindrów. Kolejne punkty pomiarowe usytuowano na instalacji okołospężarkowej, po stronie ssawnej na rozgałęzieniu rurociągów do cylindrów i po stronie tłocznej na połączeniu rurociągów cylindrów, a także na dalszej części wspólnego rurociągu przed zaworem odcinającym od pozostałej części instalacji.

Dla zespołu sprężarek NOUVO-PIGNONE, które podobnie jak sprężarki ZWICKAU nie są przystosowane do indykowania, przewidziano punkty pomiarowe na rurociągach zbiorczych po stronie ssania i tłoczenia (pp. 23 – zlokalizowany w rejonie sprężarek na ssaniu, pp. 14 – poza halą, w pobliżu połączeń rurociągów doprowadzających gaz syntezowy z rurociągami gazu obwodu recykulacji).



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych – sprężarka BORSIG



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych – instalacja technologiczna syntezy amoniaku

Na rurociągu kolektorowym tłocznym obwodu recykulacji znajduje się punkt pomiarowy (pp. 15) zlokalizowany na pomoście technologicznym, obok którego znajduje się punkt (pp. 18) na rurociągu kolektorowym ssawnym obwodu recykulacji. Wytypowano też dwa punkty pomiarowe w bezpośredniej bliskości katalitycznej kolumny konwertorowej, na jej szczycie (pp. 16) i na dole kolumny (pp. 17). Każdy punkt pomiarowy wyposażono w oddzielny zawór iglicowy odcinający, do którego dołączano czujnik pomiarowy.

Wykaz usytuowania punktów pomiarowych

- 1 – cylinder wschodni, strona zewnętrzna sprężarki BORSIG
- 2 – pulsator (sferyczny tłumik pulsacji) ssania cylindra wschodniego sprężarki BORSIG
- 3 – pulsator (sferyczny tłumik pulsacji) tłoczenia cylindra wschodniego sprężarki BORSIG
- 4 – cylinder wschodni, strona wewnętrzna sprężarki BORSIG
- 5 – cylinder zachodni, strona wewnętrzna sprężarki BORSIG
- 6 – pulsator (sferyczny tłumik pulsacji) ssania cylindra zachodniego sprężarki BORSIG
- 7 – pulsator (sferyczny tłumik pulsacji) tłoczenia cylindra zachodniego sprężarki BORSIG
- 8 – cylinder zachodni, strona zewnętrzna sprężarki BORSIG
- 9 – ssanie, cylinder wschodni i zachodni sprężarki BORSIG
- 10 – tłoczenie, cylinder wschodni i zachodni sprężarki BORSIG
- 11 – ssanie cylinder zachodni sprężarki BORSIG
- 12 – tłoczenie sprężarki BORSIG, suma
- 13 – bocznik na tłoczeniu kolektora cyrkulacji
- 14 – tłoczenie po sprężarkach NOUVO-PIGNONE
- 15 – tłoczenie po cyrkulatorach
- 16 – góra konwertora
- 17 – dół konwertora
- 18 – ssanie cyrkulatorów
- 19 – ssanie na kolektorze cyrkulacji
- 20 – tłoczenie na kolektorze cyrkulacji
- 21 – tłoczenie ZWICKAU 12
- 22 – tłoczenie ZWICKAU 13
- 23 – ssanie do sprężarek NOUVO-PIGNONE (kryza)

Usytuowanie punktów pomiarowych w instalacji przedstawiają schematy lokalizacji względem aparatów technologicznych: na rysunku 1 dla pp. 1–12, na rysunku 2 dla pp. 14–23.

Z punktu pomiarowego pp. 13 zrezygnowano, gdyż nie był on umieszczony bezpośrednio na rurociągu.

4. UKŁAD POMIAROWY

Obserwację występujących w instalacji zjawisk falowych przeprowadzono, wykorzystując aparaturę do pomiaru ciśnień szybkozmiennych z czujnikami piezoelektrycznymi i rejestracją komputerową.

Do badań wykorzystano równocześnie dwa tory pomiarowe. Pojedynczy tor pomiarowy składał się z czujnika piezoelektrycznego, przekształtnika sygnału na sygnał prądowy (w zakresie 4÷20 mA) i wzmacniacza. Pomiarów wykonano, stosując zasadę stopniowego przechodzenia przez wszystkie punkty pomiarowe, rejestrując i archiwizując komputerowo wyniki w czterech kombinacjach dla każdego z punktów. Stanowisko rejestrujące było odsunięte od sprężarki ze względu na drgania i nieuniknione wycieki gazu syntezowego działającego agresywnie na elementy aparatury pomiarowej.

Rejestrowane wewnątrz cylindrów (sprężarki BORSIG) przebiegi zmian ciśnienia w funkcji czasu były przekształcane na zamknięte wykresy indykatorowe, dzięki czemu możliwe było określanie prac indykowanych i średnich ciśnień indykowanych.

Przed przystąpieniem do badań tory pomiarowe zostały przecechowane w pełnym zakresie ciśnień czujników, a także we wszystkich przewidzianych podczas pomiarów konfiguracjach toru pomiarowego. Po zakończeniu badań tory pomiarowe poddano cechowaniu według tej samej procedury. Wykluczono w ten sposób ewentualne błędy wynikające z możliwości zmian właściwości torów pomiarowych podczas badań.

Ze względu na zmienność parametrów technologicznych, sprężarki recykulacyjne pracują w trzech konfiguracjach, a mianowicie:

- 1) pojedynczo – sprężarka BORSIG,
- 2) w układzie równoległym – sprężarka BORSIG ze sprężarką ZWICKAU,
- 3) w układzie równoległym – dwie sprężarki ZWICKAU.

W związku z tym przeprowadzono trzy serie pomiarowe, po jednej dla każdej konfiguracji pracy instalacji. Serie pomiarowe zaplanowano tak, by rozpocząć i kończyć każdą z nich tą samą kombinacją punktów pomiarowych. Termin pomiarów wybrano na okres stałej wydajności instalacji.

Nieprawidłowości w pracy instalacji pojawiały się przy włączaniu w układ recykulacji sprężarki BORSIG, tak więc przedstawiona analiza została ograniczona do serii, w których ta sprężarka pracowała.

5. WSPÓŁPRACA SPRĘŻARKI BORSIG Z INSTALACJĄ RECYRKULACJI MIESZANKI SYNTEZOWEJ

Pierwszą serię pomiarową przeprowadzono, gdy w układzie recykulacji mieszanek syntezową przetłaczała sprężarka BORSIG.

Przed przystąpieniem do badań opracowano schemat pomiarowy (tab. 1), zakładający prowadzenie pomiarów równocześnie dwoma torami. Każdą kombinację pomiaru dwóch punktów wykonywano dwa razy ze zmianą toru pomiarowego, tak aby wyniki uzyskane z pomiaru jednym torem weryfikować drugim torem pomiarowym. Dodatkowo seria pomiarowa zaczynała i kończyła się tą samą kombinacją punktów pomiarowych. Tak przygotowany plan zawierał 64 podwójne próby pomiarowe.

Tabela 1. Schemat pomiarowy

Nr	Punkty pomiarowe	Nr	Punkty pomiarowe	Nr	Punkty pomiarowe	Nr	Punkty pomiarowe
1	15,18	17	14,20	33	1,4	49	8,5
2	18,15	18	20,14	34	4,1	50	5,8
3	16,15	19	23,14	35	3,1	51	5,7
4	15,16	20	14,23	36	1,3	52	7,5
5	17,16	21	14,12	37	10,3	53	7,10
6	16,17	22	12,14	38	3,10	54	10,7
7	18,17	23	9,15	39	1,5	55	10,12
8	17,18	24	15,9	40	5,1	56	12,10
9	17,15	25	11,9	41	5,6	57	12,15
10	15,17	26	9,11	42	6,5	58	15,12
11	14,17	27	9,2	43	6,11	59	19,20
12	17,14	28	2,9	44	11,6	60	20,19
13	15,14	29	2,1	45	8,6	61	18,19
14	14,15	30	1,2	46	6,8	62	19,18
15	20,15	31	4,2	47	7,8	63	15,18
16	15,20	32	2,4	48	8,7	64	18,15

Ocena jakościowa i ilościowa współpracy sprężarki Borsig z instalacją recyrkulacji mieszanki syntezowej

Przebiegi zmian ciśnienia w cylindrach są przedstawione w postaci wykresów w funkcji czasu (wykresy otwarte) i w funkcji skoku tłoka (wykresy zamknięte).

Jeżeli prześledzi się wykresy dla obu cylindrów (rys. 3), to widać, iż występują znaczne różnice w przebiegu ich pracy. Równocześnie można zauważyć, że dla każdego z nich, praca jego strony wewnętrznej i zewnętrznej przedstawia się podobnie w sensie jakościowym i ilościowym. Natomiast przy porównaniu pracujących równocześnie stron zewnętrznych lub wewnętrznych cylindrów ujawniają się znaczne różnice zarówno jakościowe, jak i ilościowe na wykresach obrazujących ich pracę.

Analiza ilościowa wykresów zmian ciśnienia w funkcji tłoka ujawniła różnice w pracy cylindrów, powodujące zarazem różnice ich udziału w wydajności sprężarki.

Udziały te wynoszą:

- cylinder „wschodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 1) – 25,69%,
 - strona wewnętrzna (pp. 4) – 25,75%;
- cylinder „zachodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 8) – 25,08%,
 - strona wewnętrzna (pp. 5) – 23,47%.

Różnica udziałów pomiędzy równocześnie pracującymi stronami zewnętrznymi cylindrów wynosi 2,4%, a stronami wewnętrznymi 9,7%.

Średnie ciśnienia indykowane wynoszą:

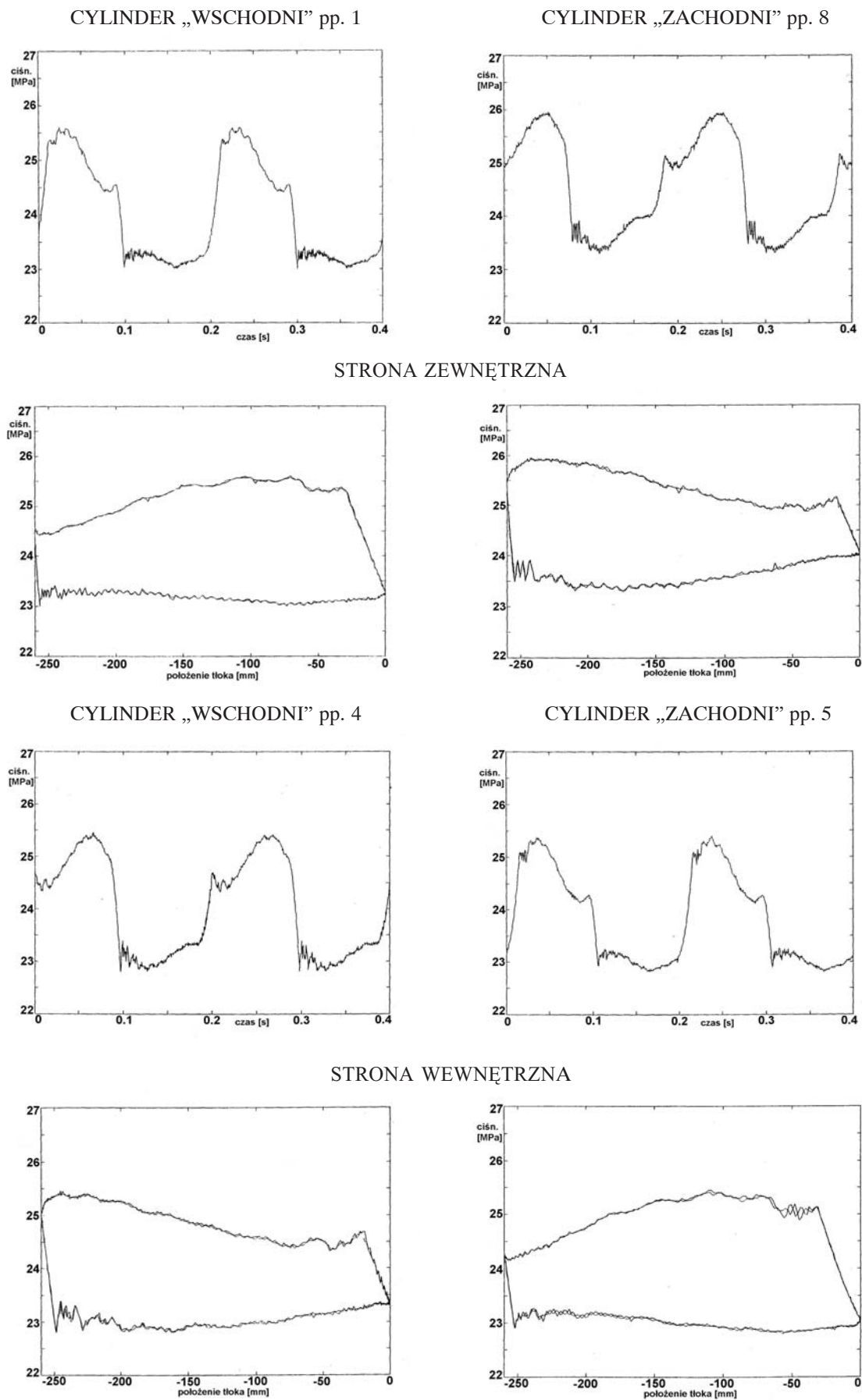
- cylinder „wschodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 1) – 2008,24 kPa,
 - strona wewnętrzna (pp. 4) – 2012,89 kPa;
- cylinder „zachodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 8) – 1960,53 kPa,
 - strona wewnętrzna (pp. 5) – 1834,87 kPa.

Prace indykowane wynoszą:

- cylinder „wschodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 1) – 21,689 kJ,
 - strona wewnętrzna (pp. 4) – 21,739 kJ;
- cylinder „zachodni”:
 - strona zewnętrzna (pp.8) – 21,174 kJ,
 - strona wewnętrzna (pp.5) – 19,816 kJ.

Ilościowe zmiany wartości ciśnienia w poszczególnych cylindrach w trakcie ich kolejnych etapów pracy wskazują na występowanie znacznych różnic – wyniki przedstawia tabela 2.

Porównując stronę zewnętrzną i wewnętrzną cylindra „wschodniego”, należy stwierdzić, że poszczególne etapy pracy przebiegają w tych samych zakresach ciśnień, a więc i praktycznie przy tych samych różnicach ciśnień. W przypadku drugiego cylindra widać znaczne rozbieżności w zakresach ciśnień między stroną zewnętrzną i wewnętrzną, również różnice ciśnień dla poszczególnych procesów bardziej od siebie odbiegają. Dla cylindra „wschodniego” po stronie ssania następuje spadek ciśnienia o wartości 0,35 MPa, podczas gdy dla cylindra „zachodniego” wartość ta mieści się w zakresie od 0,5 do 0,65 MPa, co wynika ze spadku ciśnienia na początku procesu zasysania, po którym następuje gwałtowny jego wzrost. Różnice te wynikają w głównej mierze z niesymetryczności strony ssawnej instalacji okołosprężarkowej, powodującej odmienne warunki dopływu mieszanki do zaworów ssących cylindrów, wpływające bezpośrednio na ich napełnianie. Proces sprężania w cylindrze „wschodnim” charakteryzuje się przyrostem ciśnienia rzędu 2 MPa, natomiast w „zachodnim” są to wartości 1,17 do 1,32 MPa, wynikiem czego są duże różnice w przebiegu linii tłoczenia. Przyrost ciśnienia w czasie sprężania w „wschodnim” cylindrze jest wystarczająco duży, aby otwarły się zawory i rozpoczął się proces wytłaczania mieszanki, co obrazuje na wykresie spadek ciśnienia tłoczenia.



Rys. 3. Wykresy przebiegu zmian ciśnienia w funkcji czasu i w funkcji skoku tłoka dla sprężarki BORSIG przy współpracy z instalacją recykulacji mieszanki syntezowej sprężarki BORSIG

Tabela 2. Ilościowe zmiany wartości ciśnienia w cylindrach

Cylinder „wschodni”, MPa			Cylinder „zachodni”, MPa		
Strona zewnętrzna (pp. 1)	Wartości ciśnień	Różnica ciśnień	Strona zewnętrzna (pp. 8)	Wartości ciśnień	Różnica ciśnień
Ssanie	23,00÷23,35	0,35	Ssanie	23,35÷24,00	0,65
Sprężanie	23,23÷25,30	2,07	Sprężanie	24,00÷25,17	1,17
Tłoczenie	24,40÷25,56	1,16	Tłoczenie	24,95÷25,95	1,00
Rozprężanie	23,10÷24,50	1,40	Rozprężanie	23,55÷25,50	1,95
Strona wewnętrzna (pp. 4)	Wartości ciśnień	Różnica ciśnień	Strona wewnętrzna (pp. 5)	Wartości ciśnień	Różnica ciśnień
Ssanie	22,85÷23,20	0,35	Ssanie	22,85÷23,35	0,50
Sprężanie	23,06÷25,12	2,06	Sprężanie	23,35÷24,67	1,32
Tłoczenie	24,17÷25,40	1,23	Tłoczenie	24,40÷25,44	1,04
Rozprężanie	22,95÷24,23	1,28	Rozprężanie	22,88÷25,00	2,12

W przypadku „zachodniego” cylindra występuje mały przyrost ciśnienia sprężania ograniczający otwarcie zaworów tłocznych, co powoduje, że w czasie, gdy powinien nastąpić już wypływ, trwa sprężanie czynnika. Dlatego ciśnienie rozprężania dla „wschodniego” cylindra mieści się w granicach od 1,28 do 1,4 MPa, a dla zachodniego ma wartości 1,95 do 2,12 MPa. Porównując równocześnie pracujące cylindry, można stwierdzić różnice pomiędzy ciśnieniem zamknięcia zaworu tłoczego i ciśnieniem otwarcia zaworu ssawnego, dla strony zewnętrznej wynosi ona 39,29%, a wewnętrznej – 65,62%. Bezwzględna przekraczająca 1 MPa, różnica ciśnienia końca wytłaczania i wypływu dla równocześnie pracujących stron jest przyczyną powstawania zjawisk dynamicznych po stronie tłocznej instalacji okółosprężarkowej. Powstają pulsacje pomiędzy równocześnie pracującymi stronami cylindrów, tworząc falę ciśnienia przenoszącą się na pozostałą część instalacji. Niesymetryczna budowa strony tłocznej instalacji okółosprężarkowej dodatkowo wzmacnia zjawisko.

6. WSPÓLPRACA SPRĘŻAREK BORSIG I ZWICKAU Z INSTALACJĄ RECYRKULACJI MIESZANKI SYNTEZOWEJ

Kolejną serię pomiarową wykonano, gdy w układzie recyrkulacji pracowały równolegle sprężarka BORSIG ze sprężarką ZWICKAU.

W tym przypadku ustalono 68 podwójnych pomiarów, które również zaczynały i kończyły się takimi samymi kombinacjami punktów pomiarowych jak w poprzedniej serii. Wszystkie serie pomiarowe rozpoczynały i kończyły się w tych samych punktach.

Ocena jakościowa i ilościowa współpracy sprężarek BORSIG i ZWICKAU z instalacją recyrkulacji mieszanki syntezowej

Współpraca sprężarki BORSIG ze sprężarką ZWICKAU w układzie recyrkulacji została również przedstawiona poprzez wykresy przebiegów zmian ciśnienia w cylindrach w funkcji czasu (wykresy otwarte) i w funkcji skoku tłoka (wykresy zamknięte) wykonanych dla sprężarki BORSIG (rys. 4).

Włączenie do układu recyrkulacji sprężarki ZWICKAU spowodowało zmniejszenie różnic ilościowych, jednak nie przyczyniło się do ograniczenia różnic jakościowych.

Porównanie udziału w wydajności sprężarki poszczególnych cylindrów w tej serii pomiarowej wykazało mniejsze różnice pomiędzy współpracującymi stronami cylindrów.

Udziały te wynoszą:

- cylinder „wschodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 1) – 25,41%,
 - strona wewnętrzna (pp. 4) – 24,94%;
- cylinder „zachodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 8) – 25,88%,
 - strona wewnętrzna (pp. 5) – 23,77%.

Różnica pomiędzy równocześnie pracującymi stronami zewnętrznymi cylindrów wynosi 1,86%, a stronami wewnętrznymi 4,92%.

Średnie ciśnienia indykowane wynoszą:

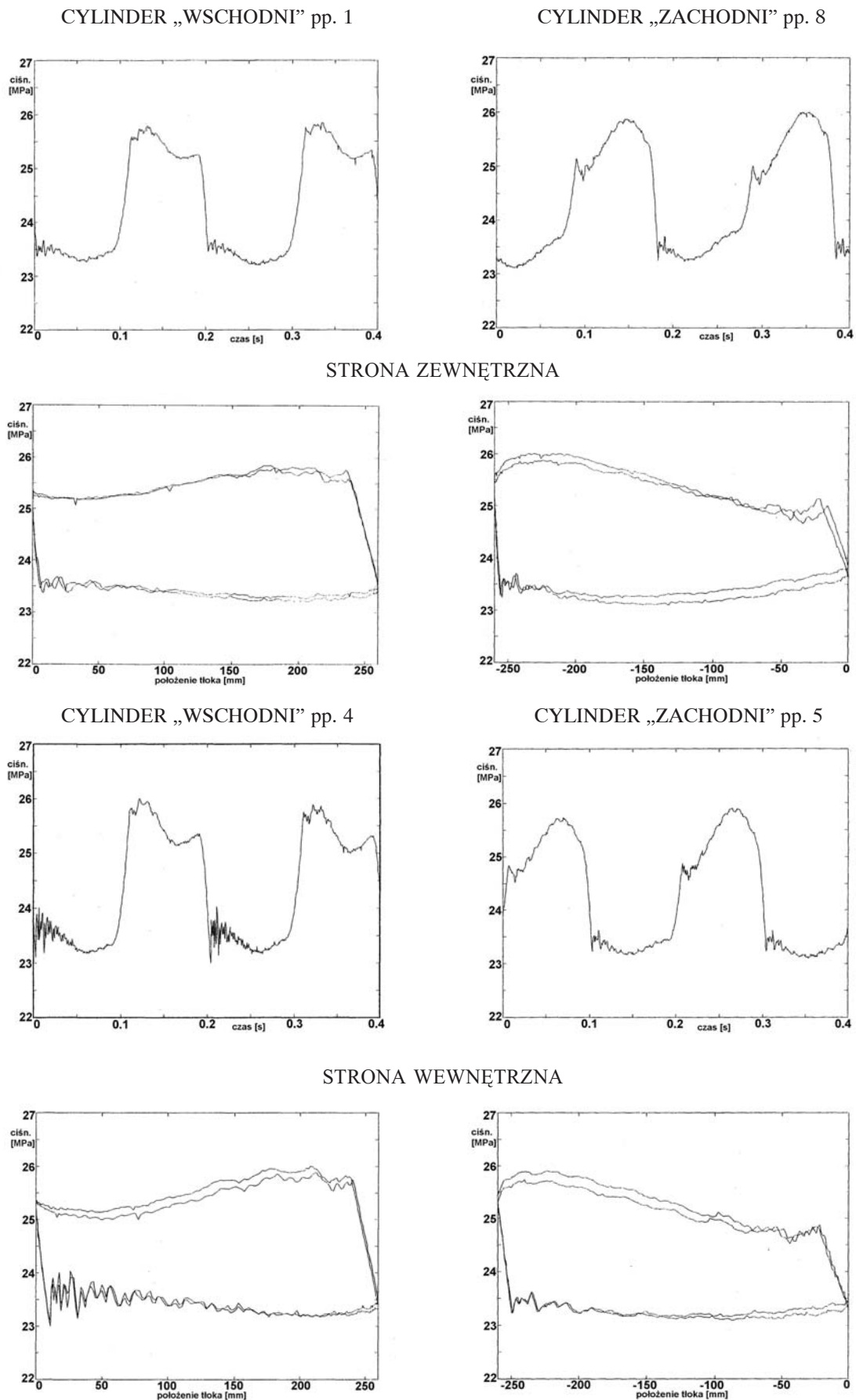
- cylinder „wschodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 1) – 1996,60 kPa,
 - strona wewnętrzna (pp. 4) – 1959,37 kPa;
- cylinder „zachodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 8) – 2033,84 kPa,
 - strona wewnętrzna (pp. 5) – 1867,45 kPa.

Prace indykowane wynoszą:

- cylinder „wschodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 1) – 21,563 kJ,
 - strona wewnętrzna (pp. 4) – 21,161 kJ;
- cylinder „zachodni”:
 - strona zewnętrzna (pp. 8) – 21,965 kJ,
 - strona wewnętrzna (pp. 5) – 20,168 kJ.

Ilościowe zmiany wartości ciśnienia w poszczególnych cylindrach w trakcie ich kolejnych etapów pracy wskazują na występowanie znacznych różnic – wyniki przedstawia tabela 3.

Jeżeli porówna się strony cylindra „wschodniego”, widać znaczące różnice pomiędzy nimi, co nie występuje w cylindrach „zachodnim”. W poprzedniej serii pomiarowej sytuacja była odwrotna.



Rys. 4. Wykresy przebiegu zmian ciśnienia w funkcji czasu i w funkcji skoku tłoka dla sprężarki BORSIG przy współpracy z instalacją recykulacji mieszanki syntezowej sprężarki BORSIG wraz ze sprężarką ZWICKAU

Tabela 3. Ilościowe zmiany wartości ciśnienia w cylindrach

Cylinder „wschodni”, MPa			Cylinder „zachodni”, MPa		
Strona zewnętrzna (pp. 1)	Wartości ciśnień	Różnica ciśnień	Strona zewnętrzna (pp. 8)	Wartości ciśnień	Różnica ciśnień
Ssanie	23,22÷23,63	0,41	Ssanie	23,10÷23,75	0,65
Sprężanie	23,45÷25,66	2,21	Sprężanie	23,72÷25,10	1,38
Tłoczenie	25,16÷25,82	0,66	Tłoczenie	24,72÷26,00	1,28
Rozprężanie	23,50÷25,30	1,80	Rozprężanie	23,32÷25,50	2,18
Strona wewnętrzna (pp. 4)	Wartości ciśnień	Różnica ciśnień	Strona wewnętrzna (pp. 5)	Wartości ciśnień	Różnica ciśnień
Ssanie	23,16÷23,98	0,82	Ssanie	23,13÷23,60	0,47
Sprężanie	23,38÷25,74	2,36	Sprężanie	23,40÷24,80	1,40
Tłoczenie	25,00÷26,00	1,00	Tłoczenie	24,55÷25,85	1,30
Rozprężanie	23,10÷25,30	2,20	Rozprężanie	23,27÷25,38	2,11

Należy też zauważyć, iż w cylindrze „wschodnim” różnice ciśnień sprężania i rozprężania stały się wartościami bardzo zbliżonymi, podczas gdy w cylindrze „zachodnim” nadal znacznie od siebie odbiegają. Po stronie wewnętrznej cylindra „wschodniego” pojawiają się na początku ssania duże pulsacje ciśnienia przekładające się na różnicę ciśnień 0,82 MPa w tym etapie procesu. Jednak patrząc na całość procesu dla cylindra „wschodniego”, należy stwierdzić, że zarówno w sensie jakościowym, jak i ilościowym przebiega on znacznie lepiej niż przy pracy samej sprężarki BORSIG. W cylindrze „zachodnim” sprężanie nadal odbywa się przy za małej różnicy ciśnień (1,38÷1,40 MPa), w związku z czym w etapie tłoczenia ciśnienie rośnie. Poprawa pracy cylindra „wschodniego” powoduje, iż różnica ciśnień równocześnie rozprężających stron zewnętrznych wynosi 21,11%, a wewnętrznych 4,26%.

Analiza wykresów zamkniętych dla sprężarki BORSIG pozwala stwierdzić pojawienie się synchronicznego pulsowania ciśnienia w części ssawnej i tłocznej sprężarki. Zjawisko to, bez wątpienia mające negatywny wpływ na instalację, można w dużej mierze wytłumaczyć różną częstotliwością pracy sprężarek oraz faktem zasilania ich silni-

kami asynchronicznymi. W wyniku czego na połączeniu z magistralą pulsacje ciśnienia wytworzone przez sprężarkę BORSIG nakładają się na pulsacje ciśnienia pochodzące od sprężarki ZWICKAU, powodując okresowe wzmocnienie fali, które przemieszcza się w kierunku kolumny katalitycznej i powoduje drgania zarówno kolumny, jak i rurociągów.

Potwierdzeniem istotnego niekorzystnego wpływu zjawisk dynamicznych na pracę sprężarki BORSIG są pojawiające się różnice w przebiegu linii ssania i tłoczenia dwóch kolejnych cykli jej pracy.

7. PODSUMOWANIE

Do prawidłowej współpracy maszyn w instalacji syntezy amoniaku wymagane są:

- symetria instalacji okołosprężarkowej sprężarki BORSIG po stronie ssania i tłoczenia,
- odpowiednie pojemności tłumików pulsacji zarówno dla sprężarki BORSIG jak i sprężarek ZWICKAU,
- separacja maszyn elementami złożonymi z dyfuzora, części walcowej i konfuzora o odpowiednich wymiarach.