



AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
WYDZIAŁ ODLEWNICTWA



Katedra Inżynierii Procesów Odlewniczych

=====

ROZPRAWA DOKTORSKA

Mgr inż. Grzegorz Dajczer

*Zintegrowany proces wykonywania rdzeni odlewniczych metodą
dmuchową z zastosowaniem obniżonego ciśnienia
odpowietrzenia rdzennicy*

Promotor naukowy: Prof. dr hab. inż. Rafał Dańko
Promotor pomocniczy: dr inż. Mateusz Skrzyński

Kraków 2023r.

Pragnę podziękować Promotorowi mojej pracy **Panu Profesorowi Rafałowi Dańko**
za pomoc naukową i wsparcie merytoryczne przy pisaniu pracy.
Dziękuję Panu **Doktorowi Mateuszowi Skrzyńskiemu** za pomoc naukową
i techniczną w organizowaniu stanowiska badawczego.
Dziękuję mojej żonie **Agnieszce** i Rodzinie za wsparcie w trakcie realizowania pracy.

Spis treści

Streszczenie.....	5
Abstract.....	12
Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	18
1. Wstęp.....	19
2. Wprowadzenie.....	21
3. Charakterystyka ogólna stanu badań klasycznych odmian procesu dmuchowego w świetle danych literaturowych	26
3.1. Tematyczne nurty publikacji.....	26
3.2. Podsumowanie analizy stanu badań klasycznych odmian procesu dmuchowego	29
4. Uzasadnienie wyboru tematu	32
5. Założenia i program tematyczny rozprawy	35
6. Analiza modeli procesów dmuchowych w ujęciu klasycznym	37
6.1. Model procesu nadciśnieniowego – klasyczny model P.N.Aksjonowa i jego rozwiązania	42
6.2. Rozszerzony model procesu wstrzeliwania masy w układzie powyżej ciśnienia atmosferycznego	44
6.3. Jednowymiarowy przepływ quasi - ustalony – model procesu podciśnieniowego wg. M. Ślęzyka.....	50
7. Koncepcja rozwiązania zintegrowanego procesu nadciśnienia z podciśnieniem....	56
Zawór strzałowy	57
8. Obliczenia numeryczne ciśnienia i parametrów przepływu powietrza w zespole strzelarki oraz rdzennicy dla wybranych warunków procesowych	62
9. Cel i tezy badawcze pracy	70
9.1. Cel pracy	70
9.2. Tezy pracy.....	71
10. Metodyka badań.....	72
10.1. Charakterystyka istniejącego stanowiska badawczego	72
10.2. Koncepcja projektowa stanowiska badawczego	75
10.3. Konstrukcja rdzennicy do badań	78
10.4. Koncepcja projektowo - wykonawcza instalacji pneumatycznej	81

11. Badania wstępne wstrzeliwania masy testowej na zmodernizowanym stanowisku laboratoryjnym.....	87
11.1. Metodyka prowadzonych badań.....	87
11.2. Wyniki badań wstępnych i ich analiza	90
12. Badania technologiczne na stanowisku do zintegrowanego procesu dmuchowego nadciśnieniowo-podciśnieniowego	104
12.1. Program i wyniki porównawcze badań procesu dmuchowego nadciśnieniowego	105
12.2. Program i wyniki badań procesu z podciśnieniem	123
13. Badania technologiczne w zintegrowanym procesie nadciśnienia z podciśnieniem	138
13.1. Badania zapęnlania rdzennicy bez zamontowanych przegród	140
13.2. Badania w warunkach z przegradami w rdzennicy	153
14. Podsumowanie i wnioski	161
SPIS LITERATURY	165
Spis rysunków.....	173
Spis tabel.....	178
Album tabel danych pomiarowych i rysunków.....	180

Streszczenie

Rozprawa pt. „Zintegrowany proces wykonywania rdzeni odlewniczych metodą dmuchową z zastosowaniem obniżonego ciśnienia odpowietrzenia rdzennicy”, zrealizowany na Wydziale Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie 2023.

Zamieszczony w pracy spis treści eksponuje szczegółowo zawartość rozprawy składającą się ogółem z 14 rozdziałów, wykazu literatury oraz spisu rysunków i tabel. Rozdziały od 1 do 3, zawierające kolejno: wstęp, wprowadzenie oraz charakterystykę ogólną stanu badań klasycznych odmian procesu dmuchowego w świetle danych literaturowych, mają charakter opracowania kompilacyjnego poprzedzonego wykazem ważniejszych oznaczeń i zakończonym podsumowaniem. Stanowią one nawiązanie do własnej części pracy, scharakteryzowanej przez uzasadnienie podjęcia rozprawy (rozdział 4), jej założeń i programu tematycznego (rozdział 5). Podstawy naukowe analizowanych klasycznych modeli dmuchowych omówiono w rozdziale 6 na przykładzie modelu przepływu strumieni powietrza w ujęciu klasycznym podanym przez PN Aksjonowa oraz omówienia innych tego rodzaju modeli tzw. rozszerzonych przez innych autorów, w tym modelu uwzględniającego rozdział strumieni powietrza w rozwiązaniu obejmującym hipotetycznie połączone zespoły klasycznej maszyny dmuchowej oraz jej części wyposażonej w systemy zmniejszania ciśnienia w przestrzeni technologicznej (rdzennicy), połączonej z autonomicznym systemem odciągu powietrza przez odpowietrzenia.

Przeprowadzono obliczenia numeryczne ciśnienia i parametrów przepływu powietrza w zespole strzelarki oraz rdzennicy dla wybranych warunków procesowych na przykładzie dla dwóch następujących granicznych stanów układu:

Graniczny stan układu oznaczony, jako Stan I.

Stan, w którym gradient ciśnienia powietrza w trójsegmentowej rdzennicy jest wywołany przez otwarcie zaworu przy zbiorniku połączonym z pompą próżniową i wyciąganie powietrza przez otwory odpowietrzające usytuowane w górnych częściach obydwu bocznych sektorów rdzennicy. Sektor środkowy rdzennicy o pojemności zbliżonej do 1/3 jej pojemności całkowitej ma w tym przypadku nieaktywne odpowietrzenia górne i jest symetrycznie połączony z obu sąsiednimi sektorami bocznymi za pomocą prawego, bądź lewego kanału uzyskanego przez wycięcie w bocznych wkładkach prostokątnych otworów każdy o powierzchni $2,5 \text{ cm}^2$.

W początkowym stanie procesowym komora nabojoya napełniona masą rdzeniową jest otwarta do otoczenia poprzez otwarty (lub odłączony) zawór strzałowy i służy, jako zbiornik masy połączony przez otwór strzałowy i sektor środkowy z bocznymi wnękami rdzennicy.

W rozważanym stanie I ciśnienie powietrza w rdzennicy i w komorze nabojoyej jest równe wartości ciśnienia otoczenia przyjętego umownie $p_{ot} = 1000$ hPa. Ciśnienie to jednocześnie jest górnym ciśnieniem powodującym przepływ zarówno powietrza, jak również czynnikiem wywołującym zasysanie części masy rdzeniowej z komory nabojoyej do sektora środkowego, a dalej jej przenoszenia w strumieniu powietrza symetrycznie przez wycięcia w obu wkładkach do sektorów bocznych i kolejno w kierunku otwartych otworów odpowietrzających w górnej części (ewentualnie z boków) rdzennicy. Warunkiem takiego przebiegu ruchu powietrza i masy jest szczelne połączenie otworów odpowietrzających z komorą podciśnienia otaczającą całość lub wydzieloną część rdzennicy, w której uzyskiwane zagęszczenie masy bez wspomagania podciśnieniowego jest mniejsze od wartości wymaganej, determinującej jakość danego odlewu.

Graniczny stan układu oznaczony, jako Stan II.

W rozważanym stanie oznaczonym II ciśnienie powietrza w rdzennicy i w komorze nabojoyej jest wynikiem określonego bilansu przepływu powietrza, które zostaje uwidocznione na zapisie graficznym będącym wynikiem obliczeń numerycznych, omówionych w dalszej części rozprawy. Podobnie jak w wersji I, również w tym przypadku warunkiem skutecznej „współpracy” przebiegu ruchu powietrza z części nadciśnieniowej poprzez masę i otwory odpowietrzające do systemu jego odciągu jest szczelne połączenie otworów odpowietrzających z komorą podciśnienia, tworzącą przestrzeń analogiczną do kolektora otaczającego całość lub wydzieloną część rdzennicy.

Na podstawie przeprowadzonej analizy modeli procesu dmuchowego o ciśnieniu procesowym powyżej ciśnienia atmosferycznego (tzw. nadciśnieniowego) i modeli, w których ciśnienie w rdzennicy ma wartość poniżej tego ciśnienia (tzw. podciśnieniowego) zostały sprecyzowane następujące wnioski:

- W oparciu o powyższe stwierdzenia zasadnicza różnica dotyczy układu połączenia z siecią zbiorników czynnika pneumatycznego w instalacji i sposobu oraz kolejności ich uaktywniania procesowego, znaczącego tym, że:

- w modelu nadciśnieniowym (na przykład klasycznym Aksjonowa) przepływ powietrza o większym ciśnieniu następuje poprzez komory (zbiorniki) i przestrzeń technologiczną, w której zagęszczana jest masa przy naturalnym odpływie powietrza do otaczającej atmosfery,
- w innym modelu nadciśnieniowym (na przykład J. Dańki) sieć pneumatyczna poprzedzająca przestrzeń technologiczną ma zwiększoną ilość komór, przez które przepływa powietrze docierające do przestrzeni technologicznej, w której zagęszczana jest masa. Podobnie jak wyżej, odpływ powietrza następuje do otaczającej atmosfery. W obydwu modelach źródłem energii jest sprężone powietrze zawarte w zbiornikach zasilających połączonych z siecią sprężonego powietrza.
- W modelu podciśnieniowym przestrzeń technologiczna jest otwarta od strony otworu strzałowego oddzielona zaworami łączącymi kanały odpowietrzające z komorą podciśnieniową, do której jest odciągane powietrze. W modelu podciśnieniowym o charakterze przepływowym strumienia odciąganego powietrza przestrzeń technologiczna znajduje się w komorze podciśnienia, która otacza rdzennicę lub jej część wyposażoną w system odpowietrzenia. Różnica ciśnienia we wnętrzu oraz w komorze podciśnienia wytwarzając określony gradient ciśnienia w warstwach masy jest źródłem energii potrzebnej na przemieszczanie się warstw masy w badanej przestrzeni technologicznej. Zasobem energii jest ilość powietrza, zarówno tego, które przemieszczając się w układzie: komora strzałowa (zbiornik) masy rdzeniowej - wnętrza rdzennicy, jest w stanie stworzyć dwufazową mieszaninę masa-powietrze i wykonać pracę przemieszczania fazy stałej wraz z fazą gazową, w wyniku ekspansji zassanego i/lub wprowadzonego powietrza płynącego w stronę o niższym ciśnieniu, a więc do układu odciągu powietrza zakończonego pompą powietrzną.

W rozprawie wykazano, że koncepcja zintegrowanego procesu dmuchowego zaproponowana przez Doktoranta generuje nowe rozwiązanie systemu dmuchowego, które rozszerza rzeczywisty zakres stosowanego przedziału ciśnienia roboczego, tradycyjnie większego od ciśnienia otoczenia o tę część ciśnienia, którą można usunąć z rdzennicy przez jej połączenie z zespołem pompy odsysającej. W zamieszczonym opisie badania obejmuje zespół prac wstępnych, w tym projekt uzupełnienia istniejącego stanowiska badawczego o instalację uzyskiwania

zmniejszonego ciśnienia (podciśnienia) w miejscach rozłożenia w rdzennicy otworów odpowietrzających, co powoduje zwiększenie skuteczności odpowietrzenia całej lub fragmentu wnęki rdzennicy, stwarzając szerokie możliwości kształtowania wartości i usytuowania aktywnych stref o zmniejszonym ciśnieniu.

Na podstawie rozwiniętej koncepcji projektowej zmiany istniejącego stanowiska laboratoryjnego (Wydział Odlewnictwa AGH), uwzględniono działania modernizacyjne z dostosowaniem do opcjonalnej realizacji badania procesu z nadciśnieniem, podciśnieniem i/lub procesu zintegrowanego. Część badawcza pracy obejmuje sformułowanie celu i tez naukowych pracy (rozdział 9.1 i 9.2), opisu metodyki badań - na istniejącym oraz na zmodernizowanym stanowisku badawczym (rozdział 10), którego projekt obejmował także konstrukcję rdzennicy (rozdział 10.2), instalacji pneumatycznej, a także układu pomiarowego i rejestrującego (rozdział 10.2- 10.5).

W rozprawie wyartykułowane zostały następujące cele badawcze i użyteczne:

1. Zintegrowanie dwóch zakresów procesu dmuchowego, czyli zwyczajowo stosowanego nadciśnienia występującego w układzie maszyny dmuchowej oraz podciśnienia wywołanego kontrolowanym strefowym odciąganiem powietrza z przestrzeni technologicznej w celu poprawy, jakości wykonywania rdzeni o rozbudowanej geometrii kształtu.
2. Uzyskanie możliwości wpływu na właściwości quasi-hydrauliczne strumienia piaskowo-powietrznego i przebiegu procesu technologicznego za pomocą dołączenia do konstrukcji rdzennicy dodatkowego układu z instalacją podciśnienia w miejscach rozłożenia otworów odpowietrzających, a tym samym poszerzenie zakresu potencjalnego oddziaływania ciśnienia zarówno na zapełnianie, jak również na zagęszczenie masy z wykorzystaniem odpowiednio ukształtowanego gradientu ciśnienia we wnękach rdzennicy.
3. Poprawę jakości rdzeni wynikającą z możliwości zapełnienia pustek w trudnodostępnych sektorach rdzennicy i kontrolowanego zagęszczania oraz likwidację stref o niedostatecznej wytrzymałości.
4. Zwiększenie stopnia efektywnego wykorzystania gazowych czynników utwardzających w technologii mas chemoutwardzalnych.

Zostały sformułowane następujące tezy rozprawy:

- I. System wstrzeliwania masy rdzeniowej w procesie dmuchowym polegającym na integracji efektów procesu dmuchowego w cyklu pracy urządzenia w zakresie powyżej ciśnienia atmosferycznego (nadciśnienia) z efektami procesowymi uzyskanymi przy ciśnieniu mniejszym od ciśnienia otoczenia (podciśnienia), umożliwia zmianę quasi-hydraulicznych właściwości strumienia piaskowo-powietrznego i wpływa korzystnie na zwiększenie stopnia zagęszczenia w całej objętości rdzenia.
- II. W procesie dmuchowym kierunek i prędkość przemieszczania się strumienia piaskowo-powietrznego masy rdzeniowej wewnątrz rdzennicy są regulowane przez powstający gradient ciśnienia powietrza wywołany przede wszystkim przez rozmieszczenie i powierzchnię czynną odpowietrzników, a kontrolowane strefowe obniżenie ciśnienia w rdzennicy przyczynia się do stabilnego przebiegu procesu dmuchowego w miarę zapewniania rdzennicy i ograniczenia negatywnego efektu zatykania odpowietrzników przez narastające warstwy zagęszczanej masy, co występuje w tradycyjnych rozwiązaniach.

Ogólna charakterystyka części badawczej

Zasadniczą część badawczą rozprawy zawiera następujące etapy scharakteryzowane w rozdziałach, w których przedstawiono osiągnięte wyniki z badań i wnioski z poszczególnych etapów badań:

Badania wstępne – dotyczące praktycznego sprawdzenia poprawności działania stanowiska z instalacją nadciśnienia. W wyniku otrzymano charakterystyki przedstawiające zależność ciśnienia w komorze naboju i komorze rdzennicy w warunkach dobranego odpowietrzenia i bez zastosowanej masy. Drugi aspekt badań wstępnych dotyczył wstrzeliwania masy testowej do nowej rdzennicy w procesie nadciśnieniowym (bieg roboczy).

Badania technologiczne właściwe – realizowane w nadciśnieniowym i podciśnieniowym procesie dmuchowym. Dokonano analizy uzyskanych wyników badań z masą, dla których sporządzono charakterystyki w układzie: gęstość pozorna w funkcji średnicy otworu strzałowego i czasu trwania procesu. Efekt zapewniania rdzennicy określano współczynnikiem zapęnlalności wg metody Benischa i Knauffa.

W procesie zintegrowanym badania przeprowadzono bazując na założeniach i wynikach z badań wstępnych procesu nadciśnienia i podciśnienia. Próby zapełniania prowadzono z wykorzystaniem rdzennicy klasycznej oraz rdzennicy z przegrodami dzielącymi wnękę na trzy sektory, przy wdmuchiowaniu masy przez jeden otwór umieszczony w pionowej osi symetrii wnęki i rozprowadzaniu masy do sektorów bocznych przez prostokątne otwory umieszczone w dolnych częściach przegród rozdzielających, co stwarzało szczególne utrudnienie przy zasilaniu tych sektorów. Metodyka badania gęstości pozornej polegała na sondowaniu masy próbnikiem cylindrycznym, określaniu masy metodą wagową i wyznaczaniem wartości współczynnikiem zapełnialności. Proces zintegrowany daje możliwość równomiernego upakowania osnowy ziaren w całej objętości, szczególnie wówczas, gdy wywołany przepływ powietrza odbywa się do otworów odpowietrzających usytuowanych na wprost otworów dmuchowych dostarczających masę. W tym przypadku równomierność rozłożenia przyczynia się do kontrolowanej zmiany przepuszczalności w masie, co umożliwia tworzenie przestrzeni i kanałów wolnych do przepływu medium gazowego. W zależności od zastosowanego medium można wnioskować, że warunki przedmuchiwania jak i odprowadzania zużytego czynnika są wówczas sprzyjające do bezpiecznego prowadzenia procesu.

Wnioski

1. Uniwersalność stanowiska badawczego umożliwiła prowadzenie badań w układzie zintegrowanym, a także oddzielnie w systemie z nadciśnieniem i podciśnieniem.
2. Projekt konstrukcyjny nowej rdzennicy do badań spełnił swoją funkcjonalność dla procesu z nadciśnieniem i o rozbudowane elementy stanowiące istotę procesu z podciśnieniem i procesu zintegrowanego.
3. Nowa konstrukcja rdzennicy układu z instalacją podciśnienia w miejscach rozłożenia otworów odpowietrzających powoduje zwiększenie skuteczności odpowietrzenia komory technologicznej. Otrzymane wyniki wskazały na poprawne działanie odpowietrzników i dały podstawę do uzasadnienia kierunkowego przepływu strumienia piaskowo powietrznego.

4. Opracowany w trakcie realizacji pracy zintegrowany proces wstrzeliwania wpływa na zwiększenie zagęszczenia oraz bardziej równomierny rozkład gęstości pozornej w objętości rdzenia w stosunku do procesu klasycznego. Bardziej uporządkowana struktura wpływa na zwiększenie przepuszczalności rdzeni.
5. Zintegrowanie dwóch procesów, naturalnego nadciśnienia występującego w układzie maszyny dmuchowej oraz podciśnienia wywołanego kontrolowanym strefowym odciąganiem powietrza usprawnia technologię wykonywania rdzeni o rozbudowanej geometrii kształtu, które jak wykazano w rozprawie umożliwia poszerzenie zakresu potencjalnego oddziaływania ciśnienia zarówno na zapelnianie jak również na zagęszczenie masy z wykorzystaniem odpowiednio ukształtowanego gradientu ciśnienia we wnękach rdzennicy.
6. Opracowana metodyka badawcza, konstrukcja rdzennicy i zmodernizowane stanowisko wraz z właściwym układem pomiarowo rejestrującym zmiany ciśnienia w komorze naboowej i rdzennicy, wskazują na możliwość zaprojektowania stanowiska półprzemysłowego do prób technologicznych związanych z wprowadzeniem nowoczesnych technologii mas rdzeniowych i następnie jego przemodelowania do warunków przemysłowych.

Abstract

Dissertation titled; “Integrated process of making casting cores by blowing method using reduced pressure of venting the core box”, implemented at the Faculty of AGH University of Science and Technology in Krakow 2023.

The table of contents included in the work presents in detail the content of the dissertation consisting of 14 chapters, a list of literature and a list of figures and tables. Chapters 1 to 3, containing successively: introduction, introduction and general characteristics of the state of research on classic variants of the blowing process in the light of literature data, have the character of a compilation study preceded by a list of the most important markings and ended with a summary. They are a reference to the own part of the work, characterized by the justification for undertaking the dissertation (chapter 4), its assumptions and thematic program (chapter 5). The scientific basis of the analyzed classic blower models is discussed in Chapter 6, on the example of the model of air stream flow in the classical approach given by PN Aksjonow and discussion of other models of this type, the so-called extended by other authors, including a model that takes into account the separation of air streams in a solution involving hypothetically connected assemblies of a classic blowing machine and its parts equipped with pressure reduction systems in the technological space (core box), connected to an autonomous air extraction system through vents.

Numerical calculations of pressure and air flow parameters in the blaster and core box assembly were carried out for selected process conditions on the example of the following two limit states of the system:

The limit state of the system is marked as State I, in which the air pressure gradient in the three-segment core box is caused by opening the valve at the tank connected to the vacuum pump and drawing air through the vent holes located in the upper parts of both side sectors of the core box. The middle sector of the core box with a capacity close to 1/3 of its total capacity has inactive upper vents in this case and is symmetrically connected to both adjacent side sectors by means of a right or left channel obtained by cutting rectangular holes in the side inserts, each with an area of 2.5 cm^2 .

In the initial process state, the cartridge chamber filled with core sand is open to the environment through an open (or disconnected) blast valve and serves as a sand tank

connected through the blast hole and the central sector with the side cavities of the core box.

In the considered condition I, the air pressure in the core box and in the cartridge chamber is equal to the value of the ambient pressure assumed conventionally $p_{ot} = 1000 \text{ hPa}$. At the same time, this pressure is the upper pressure causing the flow of air, as well as the factor causing the suction of part of the core mass from the cartridge chamber to the central sector, and then its transfer in the air stream symmetrically through the cutouts in both inserts to the side sectors, and successively towards the open vent holes in the upper part (or sides) of the core box. The condition for such a course of air and sand movement is a tight connection of the vent holes with the vacuum chamber surrounding the whole or a separate part of the core box, in which the sand compaction obtained without vacuum support is lower than the required value determining the quality of a given casting.

In the considered condition marked II, the air pressure in the core box and in the cartridge chamber is the result of a specific balance of air flow, which is shown on the graphic record being the result of numerical calculations, discussed later in the dissertation. As in version I, also in this case the condition for effective "cooperation" of the air flow from the overpressure part through the mass and vent holes to its extraction system is a tight connection of the vent holes with the vacuum chamber, creating a space analogous to the collector surrounding the whole or a separate part of the core box.

Based on the analysis of models of the blowing process with process pressure above atmospheric pressure (so-called overpressure) and models, in which the pressure in the core box is below this pressure (the so-called under-pressure), the following conclusions have been specified:

- Based on the above statements, the main difference concerns the system of connection with the network of pneumatic medium tanks in the installation and the method and sequence of their process activation, characterized by the following:
 - in the overpressure model (e.g. the classic Aksjonov model), the flow of air with higher pressure occurs through the chambers (tanks) and the technological space in which the sand is compacted with the natural outflow of air to the surrounding atmosphere,

- In another overpressure model (for example by J. Dańki), the pneumatic system preceding the technological space has an increased number of chambers through which air flows reaching the technological space where the sand is compacted. As above, the outflow of air occurs to the surrounding atmosphere. In both models, the source of energy is compressed air contained in supply tanks connected to the compressed air system.
- In the under pressure model, the technological space is open from the side of the blast hole, separated by valves connecting the vent channels with the pressurized chamber, into which the air is extracted. In the under pressure model with a stream of extracted air flow, the technological space is located in the under pressure chamber, which surrounds the core box or its part equipped with a venting system. The pressure difference in the cavity and in the vacuum chamber, generating a specific pressure gradient in the mass layers, is the source of energy needed for the movement of the mass layers in the tested technological space. The energy resource is the amount of air, both the air that, moving in the system: blasting chamber (tank) of the core sand- cavity of the core box, is able to create a two-phase sand-air mixture and perform the work of moving the solid phase together with the gas phase, as a result of the expansion of the sucked and /or introduced air flowing towards the lower pressure side, i.e. to the air extraction system terminated with an air pump.

The thesis shows that the concept of the integrated blowing process proposed by the PhD student generates a new solution of the blowing system, which extends the actual range of the working pressure range, traditionally greater than the ambient pressure, by that part of the pressure that can be removed from the core box by connecting it to the suction pump unit.

In the description of the test, it covers a set of preliminary works, including a project to supplement the existing test stand with an installation for obtaining reduced pressure (vacuum) in the places where the vent holes are located in the core box, which increases the efficiency of venting the entire or part of the core cavity, creating a wide range of value shaping and location active reduced pressure zones.

Based on the developed design concept of changing the existing laboratory stand (Faculty of Foundry Engineering, AGH), modernization activities were taken into account, adapting to the optional implementation of the process testing with

overpressure, underpressure and/or an integrated process. The research part of the work includes the formulation of the purpose and scientific theses of the work (chapter 9.1 and 9.2), description of the research methodology - on the existing and on the modernized test stand (chapter 10), the design of which also included the structure of the core box (chapter 10.2), pneumatic installation, and measuring and recording (chapter 10.2-10.5).

The following research purposes and utilitarian goals were articulated in the dissertation:

1. Integration of two ranges of the blowing process, commonly used overpressure occurring in the blowing machine system and negative pressure caused by controlled zone air extraction from the technological space in order to improve the quality of making cores with an extensive shape geometry.
2. Obtaining the possibility of influencing the quasi-hydraulic properties of the sand-air stream and the course of the technological process by attaching an additional system to the structure of the core box with a vacuum system in the places where the vent holes are located, extending the range of potential impact of pressure both on filling and compaction of the sand with the use of a properly shaped pressure gradient in the core cavity.
3. Improving the quality of cores resulting from the possibility of filling voids in hard-to-reach sectors of the core box and controlling compaction and eliminating zones with insufficient strength.
4. Increasing the effective use of hardening agent gases in the technology of chemically hardening sands.

The following theses of the dissertation were formulated:

I. The system of core sand injection in the blowing process consisting in the integration of the effects of the blowing process in the operation cycle of the device in the range above atmospheric pressure (overpressure) with the process effects obtained at a pressure lower than the ambient pressure (underpressure), enables changing the quasi-hydraulic properties of the sand-air stream and has a positive effect on increasing the degree of compaction in the entire volume of the core.

II. In the blowing process, the direction and speed of the sand-air stream of the core sand inside the core box are regulated by the resulting air pressure gradient caused

primarily by the arrangement and active surface of the vents, and the controlled zone pressure reduction in the core box contributes to a stable course of the blowing process as it fills up the core box and limiting the negative effect of clogging the vents by the growing layers of the compacted mass, which occurs in traditional solutions.

General characteristics of the research part

The main research part of the dissertation includes the following stages characterized in chapters in which the results obtained from the research and conclusions from the individual stages of the research are presented:

Preliminary tests - concerning the practical verification of the correct operation of the stand with the overpressure installation. As a result, characteristics showing the dependence of pressure in the cartridge chamber and the core box chamber were obtained under conditions of selected venting and without sand applied. The second aspect of the preliminary tests concerned the shooting of the test sand into the new core box in the overpressure process (working run).

Appropriate technological research - carried out in overpressure and vacuum blowing process. The results of tests with sand were analyzed, for which characteristics were prepared in the following system: apparent density as a function of blast hole diameter and process duration. The effect of filling the core box was determined by the filling factor according to the Benisch and Knauff method.

In the integrated process, the research was conducted based on assumptions and the results of preliminary tests of the overpressure and underpressure process. Filling tests were carried out with the use of a classic core box and a core box with partitions dividing the cavity into three sectors, with blowing the sand through one hole located in the vertical axis of symmetry of the cavity and distributing the sand to the side sectors through rectangular holes located in the lower parts of the partitions, which created a particular difficulty when supplying these sectors. The methodology of testing the apparent density consisted in collecting the core sand with a cylindrical sampler, determining the sand with the gravimetric method and determining the value with the filling factor. The integrated process makes it possible to evenly pack the matrix of grains in the entire volume, especially when the induced air flow takes place to the vent holes located opposite the blow holes supplying the sand. In this case, the uniformity of the distribution contributes to a controlled change in the permeability in the sand, which allows the creation of spaces and channels free for the flow of the gaseous medium.

Depending on the medium used, it can be concluded that the conditions of blowing and discharge of the used medium are then conducive to the safe conduct of the process.

Conclusions

1. The universality of the test stand made it possible to conduct research in an integrated system as well as separately in a pressurized system and negative pressure.
2. The structural design of the new core box for testing has fulfilled its functionality for the process with overpressure and complex elements constituting the essence of the process with vacuum and integrated process.
3. The new design of the core box of the system with the installation of negative pressure in the places where the vent holes are located increases the efficiency of venting the technological chamber. The obtained results indicated the correct operation of the vents and provided the basis for justifying the directional flow of the sand-air stream.
4. The integrated firing process developed during the work results in an increase in density and a more even distribution of the apparent density in the core volume in relation to the classical process. A more ordered structure increases the permeability of the cores.
5. Integration of two processes, natural hypertension occurring in the system of the blowing machine and the negative pressure caused by the controlled zone air extraction improves the technology of core making with an extensive shape geometry, which, as demonstrated in the dissertation, makes it possible to extend the range of potential impact of pressure both on filling and compaction of the sand with the use of a properly shaped pressure gradient in the cavities of the core box.
6. The research methodology developed, the construction of the core box and the modernized stand, together with the appropriate measuring system recording changes in pressure in the cartridge chamber and the core box, indicate the possibility of designing a semi-industrial stand for technological tests related to the introduction of modern technologies of core sands and then its remodelling to industrial conditions.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

$A_{1,2}$	- powierzchnie przelotowe: odpowietrzeń i zaworu
dG	- chwilowa zmiana masy powietrza w analizowanej przestrzeni maszyny dmuchowej, kg/s,
d_e	- zastępcza średnica ziarna, także elementarna grubość warstwy, m,
d_i	- średnia średnica ziarna, może być arytmetyczna „a”, geometryczna „g”, reprezentatywna „r”, m,
d_l	- średnica otworu strzałowego (wylotowego), m,
f	- powierzchnia przekroju: dodane indeksy oznaczają: (f_s)- przewód sieciowy, (f_0)- zawór powietrzny, (f_1) -otwór strzałowy (dmuchowy), (f_2) oraz (Σf_2) - otwór oraz suma otworów odpowietrzających w rdzennicy, m ² ,
p	- ciśnienie absolutne powietrza, indeksy „s”, „a”, „b”, „c”, „d” oznaczają odpowiednie przestrzenie maszyny dmuchowej, MPa,
p_s	- ciśnienie robocze powietrza, MPa,
p_c	- ciśnienie w rdzennicy, MPa,
v	- objętość właściwa powietrza: indeksy „s”, „a”, „b”, „c”, „d” oznaczają odpowiednie przestrzenie maszyny dmuchowej, m ³ /kg,
M	- natężenie wypływu masy z komory nabojoyej strzelarki, kg/s,
M_{rdz}	- masa rdzenia uzyskanego w warunkach rzeczywistych, kg,
M_{st}	- umowna masa rdzenia, kg,
S_{odp}	- stopień odpowietrzenia rdzennicy
V_a	- objętość wewnętrznego zbiornika powietrznego, m ³ ,
V_b	- objętość komory nabojoyej, m ³ ,
V_c	- pojemność całkowita wnętrza rdzennicy, m ³ , także całkowita objętość strumienia mieszaniny piaskowo-powietrznej, m ³ ,

Litery greckie

κ	- wykładnik adiabaty ($\kappa=1,41$),
ρ_f	- gęstość właściwa masy zależna od jej składu, kg/m ³ ,
ρ_m	- gęstość pozorna masy, kg/m ³ ,
$\rho_{m,n}$	- średnia gęstość pozorna masy rdzeniowej zagęszczanej przez wstrzeliwanie przy nominalnym ciśnieniu (p_r) w komorze nabojoyej, kg/m ³ ,
$\rho_{m,ef}$	- średnia gęstość pozorna masy rdzeniowej zagęszczanej przez wstrzeliwanie przy rzeczywistym ciśnieniu (p_{ref}) uzyskanym w komorze nabojoyej, kg/m ³ ,
ρ_{pm}	- średnia gęstość pozorna masy rdzeniowej zagęszczanej przez wstrzeliwanie, kg/m ³ ,
ρ_{str}	- średnia gęstość strumienia mieszaniny piaskowo-powietrznej, kg/m ³ ,
ρ_{us}	- gęstość pozorna masy w stanie luźno usypanym, kg/m ³ ,
ρ_{otocz}	- gęstość otoczki zużytego materiału wiążącego, kg/m ³ (g/cm ³),
ρ_z	- gęstość materiału osnowy piaskowej, kg/m ³ (g/mm ³),
Σf_1	- sumaryczna powierzchnia dysz wylotowych z głowicy, m ² ,
Σf_2	- sumaryczna powierzchnia otworów odpowietrzających, m ² ,
t	- czas (ogólnie), s,
T_j	- temperatura w przestrzeni
$\mu_s, \mu_0,$ μ_1, μ_2	- współczynniki wydatku otworów związane z przepływem powietrza w przestrzeniach maszyny dmuchowej oznaczonych indeksami „s”, „a”, „b”, „c”, „d”,
Ψ	- liczby przepływu, powietrza przestrzeniach maszyny dmuchowej oznaczonych indeksami „s”, „a”, „b”, „c”, „d”

1. Wstęp

Produkcja rdzeni w technologii procesów dmuchowych jest od prawie 100 lat najczęściej wybierana przez odlewnie jako główny proces odtwarzania wewnętrznych części odlewów. Nowoczesny kierunek rozwoju technologii produkcji rdzeni do uzyskiwania przestrzennie skomplikowanych kształtów o zakładanych tolerancjach w klasycznym procesie maszyn dmuchowych został opisany pod względem naukowym oraz badawczym.

Aktualnie dysponowana wiedza zakresu teorii i praktyki konwencjonalnych procesów dmuchowych opiera się w dużym stopniu na wcześniejszych pracach szeregu badaczy, którzy swój wysiłek badawczy w większym stopniu skupiali na technologicznych aspektach procesu i jego aplikacji do ówczesnych tworzyw rdzeniowych oraz do istniejących wówczas metod badawczych i możliwości pomiarowych. Publikacje z ostatniej dekady są świadectwem dużego zainteresowania zarówno doskonaleniem strony technologicznej samego procesu dmuchowego, jak również istotnym postępem w budowie maszyn dmuchowych w odpowiedzi na potrzeby dynamicznego rozwoju techniki motoryzacyjnej i budowy maszyn. W monografii [50] zawarto syntezę praktycznie najbardziej aktualnych badań procesu dmuchowego oraz następujących czynników wpływających na jego przebieg:

- mechanizm tworzenia strumienia dwufazowego w części wylotowej głowicy strzałowej lub dmuchowej,
- ewakuację z komory nabojoyej w postaci strumienia swobodnego,
- fazy zapełniania rdzennicy strumieniem o zmieniającym się stanie koncentracji fazy stałej do powietrza w trakcie wspólnego przemieszczania się w rdzennicy, zgodnie z utworzonym gradientem ciśnienia,
- finalne zagęszczanie masy będące wynikiem upakowania cząstek masy pod wpływem energii kinetycznej strumienia oraz przemieszczania warstw masy o charakterze doprasowania, związanego z naciskiem na pokonanie oporu hydraulicznego podczas filtracji powietrza przez masę do odpowietrzeń.

Wykazano przy tym, że aktualny rozwój możliwości badawczych, modelowych i obliczeniowych, a także dzisiejsza technika pomiarowa pozwalają na bardziej szczegółowe podejście do zagadnień naukowych, wynikających również z wprowadzenia wielu nowych mas rdzeniowych i technologii ich utwardzania.

Istniejące technologie wykonywania rdzeni metodami dmuchowymi, w których wykorzystana jest możliwość kształtowania hydrodynamicznych właściwości mieszaniny fazy stałej oraz powietrza w celu doskonalenia procesu zapelniania i zagęszczania masy rdzeniowej w przestrzeni technologicznej nadal będą stosowane w odlewnictwie niezależnie od stosowanych technik przyrostowych 3D. Ukazany stan poznania procesów dmuchowych pozwala zwrócić uwagę na rozszerzenie możliwości istniejących rozwiązań przez wykorzystanie do kształtowania wewnętrznej struktury materiału ziarnistego pod działaniem sił wywołanych przez gradient ciśnienia związany z filtracją powietrza zasysanego z wnęki technologicznej przez otwory odpowietrzające.

Rozwiązania z podciśnieniowym sposobem zapelniania wnęk rdzennic wielokomorowych rozwiązują szereg problemów technicznych występujących w konwencjonalnych technologiach dmuchowych. Oznacza odejście od głowic dmuchowych z centralnym otworem wylotowym na rzecz wielootworowych głowic i autonomicznego systemu odpowietrzeń. Eliminuje trudności związane z zawisaniem i ewakuacją masy ze zbiornika do głowicy i wnęki technologicznej oraz zwiększa równomierny rozkład i wstępny stopień upakowania ziaren we wnęcie. Pod wpływem różnicy ciśnienia, w wyniku kierowanej filtracji powietrza, następuje frontalne przemieszczanie i zagęszczanie warstw masy wprowadzanych i pozostających we wnęcie. To stanowi lepsze warunki zagęszczania tzw. dogęszczania masy przez wstrzelenie jej dodatkowej porcji w procesie realizowanym już w sposób konwencjonalny. Zdecydowanie bardziej innowacyjne rozwiązanie, które jest tematem rozprawy polega na integracji jakby dwóch wskazanych wyżej sposobów postępowania, polegającym na równoczesną lub z minimalnie zróżnicowaną inicjacją obu systemów zapelniania, przemieszczania i zagęszczania masy we wnęcie technologicznej (rdzennica, skrzynia formierska). W pracy zostanie podjęte postępowanie obejmujące opracowanie, wyposażenie badawcze i przeprowadzenie szerokiego zakresu badań ważnych do wprowadzenia tej technologii na przykładzie technologii rdzeni.

2. Wprowadzenie

W technologii wykonania odlewów w jednorazowych formach piaskowych kształty i wymiary zewnętrzne są odtwarzane z modelu zaformowanego w masie formierskiej, a kształty i wymiary wewnętrzne przez rdzenie odlewnicze. Stąd można stwierdzić, że rdzenie to bryły o geometrii wnęki wynikającej z konstrukcyjności gotowego odlewu, często o kształcie prostym lub rozbudowanym przestrzennie. Formą do wykonania rdzeni są rdzennice, do których masa może być doprowadzana różnymi sposobami, a następnie umacniana przez zagęszczanie metodami fizycznymi lub metodami fizyko-chemicznymi, łączącymi operacje zapełniania wnęki rdzennicy, wstępnego zagęszczania masy oraz jej utwardzania metodami fizycznymi (np. suszenie) lub chemicznymi realizowanymi w temperaturze otoczenia lub podwyższonej.

W pierwszej grupie metod, uprzywilejowane miejsce zajmują metody pneumatyczne, zwane popularnie dmuchowymi, w których czynnikiem roboczym napełniania i zagęszczania masy jest energia sprężonego powietrza.

W drugiej grupie metod i sposobów pierwszy etap procesowy obejmuje napełnianie rdzennicy masą rdzeniową podlegającą wstępnemu zagęszczaniu, a następnie jest realizowany etap końcowego zagęszczania np. przez doprasowanie oraz utwardzenia (związanie) metodami termicznymi lub chemiczno-fizycznymi. W grupie metod termicznych wyróżnia się technologię tzw. gorącej rdzennicy (ozn. *ang.* HB - Hot-Box), natomiast w grupie metod fizyczno-chemicznych technologię tzw. zimnej rdzennicy (ozn. *ang.* CB - Cold-Box).

Metody dmuchowe polegają na przekazywaniu energii kinetycznej sprężonego powietrza cząstkom zagęszczanej masy odtwarzającej kształt formy lub rdzenia. Pneumatyczny czynnik napędowy w miarę postępu procesu zagęszczania wpływa z odtwarzanej formy i rdzennicy przez odpowiednio zaprojektowane otwory odpowietrzające.

Pod względem kinetyczno-dynamicznym w procesie z nadciśnieniem wyróżnia się metody:

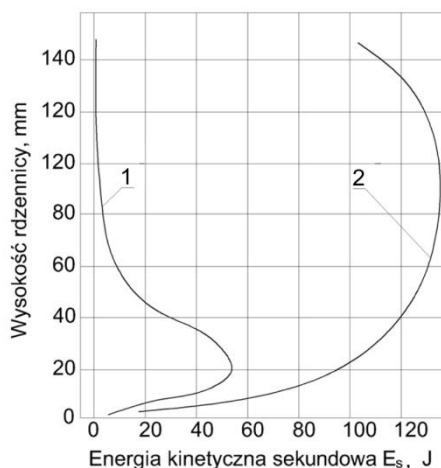
- nadmuchiwania; cząstki masy są unoszone w strumieniu powietrza. Powietrze jest czynnikiem pośredniczącym w ruchu masy,
- wstrzeliwania; cząstki masy są unoszone pod naciskiem sprężonego powietrza.

Osiągnięcie odpowiedniego stopnia zagęszczenia rdzenia odlewniczego jest związane z energią kinetyczną strugi piaskowo-powietrznej, zapewniającą w fazie właściwej procesu jej zaawansowany, quasi-ustalony wypływ, tworzenie określonej struktury zagęszczenia i osiowo symetryczny rozptył masy we wnętrzu rdzennicy [100].

Energia kinetyczna strumienia piaskowo-powietrznego powoduje bezpośrednie dynamiczne oddziaływanie strumienia na warstwy masy zalegające rdzennicę, szczególnie widoczne w osi otworu strzałowego lub dmuchowego. Wartość energii kinetycznej zależy głównie od prędkości strumienia piaskowo-powietrznego oraz gęstości tej mieszaniny - fazy gazowej i stałej.

Energia tradycyjnie jest opisana wzorem $E_k = \frac{m \cdot v_z^2}{2}$, w którym zmiana każdego czynnika powoduje zmianę wartości energii, co wskazuje na zdolność przekształcania w pracę zagęszczania masy.

Zmiana energii kinetycznej masy na różnych wysokościach rdzennicy i w zależności od usytuowania odpowietrzeń przedstawiono na rysunku 1 [100, 110].



Rys. 1. Zmiana energii kinetycznej strumienia masy na różnych wysokościach rdzennicy w zależności od usytuowania odpowietrzeń: 1 - odpowietrzenia w dolnej części rdzennicy, 2 - odpowietrzenia górne [100, 110].

W trakcie fazy końcowej pojawia się drugi czynnik dotyczący pracy oporów filtracji powietrza przez masę rdzeniową. Tworzenie stref większego zagęszczenia wywołane przez wzrost oporów przepływu powietrza przez warstwy masy

w rdzennicy powoduje występowanie miejscowego dogęszczenia bezpośrednio pod otworami dmuchowymi, a także w otoczeniu kanałów odpowietrzających [50].

Prędkość filtracji powietrza przez ośrodek porowaty została sformułowana prawem Darcy'ego i wyrażona wzorem [100]:

$$c_f = - \frac{k}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

gdzie:

$\frac{dp}{dx}$ - gradient ciśnienia wyrażony, jako elementarny spadek ciśnienia dp przy

przejściu przez warstwę o grubości dx ,

μ - współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s,

k - współczynnik przepuszczalności (filtracji) dla gazów w porowatym ośrodku.

Współczynnik " k " określa zdolność danego ośrodka do przepuszczania gazu i ma dla tego ośrodka wartość stałą niezależną od rodzaju i właściwości przepływającego płynu. Wartość k określa następująca zależność:

$$k = d_e^2 \cdot Sl \quad (2)$$

$$Sl = \frac{\mu \cdot Q}{F \cdot d_e^2} \cdot \frac{dx}{dp} \quad (3)$$

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i \cdot d_i^3}{\sum n_i}} \quad (4)$$

gdzie:

d_e - przeciętna średnica ciała porowatego, m,

Sl - bezwymiarowa liczba stosowana przy filtracji płynu (gazu) w ośrodku fikcyjnym, zwana liczbą Schlichtera,

Q - objętościowy wydatek płynu (gazu) przypadający na przekrój elementarnej warstwy ośrodka porowatego, m³/s,

F - powierzchnia poprzecznego przekroju, normalna do kierunku wektora prędkości, m²,

d_i - średnica średniego ziarna, m².

Zróźnicowanie procesu na nadmuchiwanie i wstrzeliwanie, uwidocznione schematycznie w tabeli 1 zaczerpniętej z monografii [50], przekłada się na konstrukcje maszyn do zagęszczania, stąd wyróżnia się nadmuchiwarki i strzelarki. W rozwiązaniach przemysłowych we wszystkich odmianach technologii rdzenia dominują strzelarki.

W procesie dmuchowym wytwarzany jest strumień powietrzno-masowy o określonej koncentracji wskazujący na skład ilościowy powietrze – masa rdzeniowa. Jest to jeden ze wskaźników, na podstawie, których dokonuje się umownego rozróżnienia procesów nadmuchiwania i wstrzeliwania. Inne charakterystyczne wskaźniki dla obu odmian procesu dmuchowego zamieszczono w tabeli 1 wskazując na większą intensywność narastania ciśnienia w komorze nabojoyej strzelarek i wywołaną tym większą dynamikę zachodzących zjawisk.

Tabela 1. Porównanie parametrów roboczych i cech konstrukcyjnych maszyn dmuchowych [29, 50, 108].

Lp.	Cecha konstrukcyjna Parametr roboczy	Nadmuchiarki	Strzelarki
1.	Ciśnienie robocze p_r	0,45 – 0,65 MPa (3,5 – 5,5 atm.)	0,55 -0,70 MPa (4,5 – 6,0 atm.)
2.	Stosunek powierzchni zaworu (f_0) do powierzchni wylotu z głowicy dmuchowej (strzałowej) (f_1)	$\frac{f_0}{f_1} < 1,0$	$\frac{f_0}{f_1} \geq 1,0$
3.	Rodzaj zaworu	tłokowy, membranowy jednostronny	dwustronny tłokowy typu Hansberga
4.	Intensywność narastania ciśnienia w komorze nabojoyej z masą I_p	$\frac{\Delta p}{\Delta \tau} \leq 5,0 \text{ MPa} / s$	$\frac{\Delta p}{\Delta \tau} \geq 5,0 \text{ MPa} / s$
5.	Średnica pojedynczego otworu wylotowego d_1 z głowicy dmuchowej D_{kN} lub D_{kS}	$d_{1N} = (0,1 \div 0,2) D_{kN}$	$d_{1S} = (0,2 \div 0,5) D_{kS}$
6.	Stosunek objętości rdzenia V_{rdz} do objętości komory nabojoyej V_{bN}	$\frac{V_{rdz}}{V_{bN}} = \frac{1}{3}$	$\frac{V_{rdz}}{V_{bN}} = \frac{1}{2}$
7.	Kształt otworu wylotowego masy	Płaski lub głowica dmuchowa	Stożkowy lub kształtowy
8.	Zalecany stopień odpowietrzenia rdzennicy; iloraz powierzchni otworów; iloraz powierzchni odpowietrzających do powierzchni otworów dmuchowych; T- teoretyczny, P- praktyczny	$\frac{\Sigma f_2}{\Sigma f_1} = \left\ \frac{T : 0,5 \div 1,0}{P : 1,0 \div 2,0} \right\ $	$\frac{\Sigma f_2}{\Sigma f_1} = \left\ \frac{T : 0,3 \div 0,5}{P : 0,5 \div 1,0} \right\ $
9.	Zbiornik wyrównawczy ciśnienia; stosunek objętości zbiornika zewnętrznego V_a do objętości komory nabojoyej V_{bN}	brak lub $\frac{V_a}{V_{bN}} < 4,0$	$\frac{V_a}{V_{bN}} \geq 4,0$

Inne zalety strzelarek, w porównaniu do nadmuchiwarek wyeksponowane w pracach naukowych i badawczych [36] i [72] są następujące:

- praktycznie 4-krotnie mniejsze zużycie sprężonego powietrza,
- uzyskiwanie wyższych wartości zagęszczenia masy w rdzennicy i mniejszy rozrzut jego wartości w objętości rdzenia,
- mniejsza wrażliwość na problemy wynikające z niedostatecznego odpowietrzania rdzennic,
- mniejsze wymagania dotyczące właściwości fizyczno-chemicznych mas rdzeniowych,
- mniejsze zużycie rdzennic.

Charakterystycznym w obydwu odmianach czynnikiem roboczym jest nadciśnienie o wartości większej od ciśnienia atmosferycznego. Istnieje przekonanie, uzasadnione wynikami wielu badań, że czynnikiem decydującym o zagęszczeniu jest dynamika przepływu sprężonego powietrza zależna od konstrukcji zaworu strzałowego. Procesy te są realizowane w urządzeniach tworzących następujący układ: zbiornik sprężonego powietrza wraz z instalacją, komora nabojoya (strzałowa) z masą rdzeniową, zawór strzałowy, rdzennica.

3. Charakterystyka ogólna stanu badań klasycznych odmian procesu dmuchowego w świetle danych literaturowych

Dostępne publikacje zagraniczne i krajowe, dotyczące badań klasycznych odmian procesu dmuchowego zostały szeroko omówione i scharakteryzowane we wcześniejszych opracowaniach monograficznych, mających syntetyczny charakter [15, 36, 108] oraz w licznych innych opracowaniach o charakterze poznawczym. Analiza dotyczyła badań tych odmian procesu dmuchowego, których dominujące znaczenie zostało przez lata ugruntowane w odlewnictwie zarówno przez 120 lat wpływających od zastosowania nadmuchiwarek (USA- patent Demalera 1903) i 75 lat od patentu zaworu strzałowego (F. Hansberg z Modeny - patent 1948). Obszar licznych badań, mających odzwierciedlenie w publikacjach ukazujących się od końca lat 60, również w Polsce zaznaczył się dużym udziałem badań w latach 1970 – 2000, związanych z procesem dmuchowym, głównie w zastosowaniu do wytwarzania rdzeni.

3.1. Tematyczne nurty publikacji

W bibliografii analizowanego okresu można wyodrębnić cztery główne nurty tematyczne obejmujące prace:

- **doświadczalno-badawcze o charakterze technologicznym**, reprezentowane przez prace Dieterta [53], Gade'a [61], Rakogona [110], Lesniczenki [83, 84], a następnie Pelczarskiego i innych [19, 20, 28, 32, 34, 36, 37, 39, 97, 98, 99, 100]. Osiągnięciem poznawczym tych prac jest rozgraniczenie badania zjawisk zachodzących w komorze nabojeowej maszyn dmuchowych od badań zapelniania przestrzeni technologicznej i zagęszczania w niej masy. Wykazano, że korzystniejsze wyniki zagęszczenia masy uzyskiwane w strzelarkach są wynikiem większej intensywności zjawisk zachodzących w komorze nabojeowej tych maszyn, spowodowane udoskonaleniem konstrukcji zaworu powietrznego, zastosowaniem w komorze przegrody perforowanej, zmianą kształtu otoczenia otworu w głowicy wylotowej (strzałowej), a także używanie zewnętrznego i wewnętrznego wyrównawczego zbiornika powietrza.
- **teoretyczno-analityczne**, podkreślające analogię mechanizmu zjawisk zachodzących w nadmuchiwarekach i strzelarkach. Należą do nich prace Rakogona

[110], Aksjonowa [2], Orłowa [95, 96], Lesniczenki [84, 85] oraz innych autorów [5, 18, 20, 21, 23, 25, 26, 31, 32, 35, 38, 39, 36, 40, 56, 57, 58], które miały zasadnicze znaczenie dla poznania i rozwoju procesu dmuchowego. Wykazano wówczas, że w procesie zagęszczania masy uczestniczą dwa podstawowe czynniki sprawcze, to jest energia kinetyczna strumienia piaskowo-powietrznego oraz praca oporów powietrza filtrującego przez pory masy od miejsca zasilania (otwór lub otwory strzałowe) do miejsca ewakuacji powietrza (otwory odpowietrzające) generującego odpowiednie wartości gradientu ciśnienia wewnątrz masy zalegającej w rdzennicy lub skrzyni formierskiej. Masa formierska lub rdzeniowa została przy tym zdefiniowana, jako idealny ośrodek sypki, dla którego podano warunki zastosowania liniowego prawa filtracji Darcy'ego, co stworzyło przesłanki do konstruowania maszyn dmuchowych eliminujących powstawanie kraterów w masie. W pracach realizowanych w tym czasie w AGH zidentyfikowano i opisano zjawisko naporu dynamicznego, wywieranego przez strumień piaskowo-powietrzny na warstwy masy znajdujące się w rdzennicy w trakcie jej zapełniania. Badania autorskie [15, 19, 20, 28, 36, 37, 39, 97, 98, 99, 108] prezentują nową koncepcję określania hydrodynamicznych właściwości dwufazowej strugi, będącej mieszaniną powietrza i masy rdzeniowej za pomocą nowych metod pomiarowych. Badania te także stanowiły podstawę do identyfikacji mechanizmu ewakuacji masy z komory nabojoyej i zapełniania rdzennicy. Eksperymentalnie potwierdzono, że już w obrębie komory nabojoyej tworzą się warunki wywierające istotny wpływ na ukształtowanie właściwości quasi hydraulicznych strumienia piaskowo-powietrznego. Warunki te decydują o jego energii kinetycznej poprzez wpływ na prędkość i stężenie fazy stałej w strumieniu powietrza, co w końcowym efekcie określa przebieg i efekty zapełniania i zagęszczania masy w rdzennicy.

- **prace dotyczące modelowania i symulacji komputerowej**, obejmujące prace Aksjonowa [2], który jako pierwszy opracował uproszczony model teoretycznego obliczania przepływu strumieni powietrza w maszynie dmuchowej. Model ten został rozwinięty i dostosowany do strzelarek nowszej generacji w latach 90. ubiegłego wieku w pracach [30, 36], a znacznie wcześniej wykorzystane do wyprowadzenia przez Kura [81] wzoru do obliczania stopnia odpowietrzenia rdzennicy, w zależności od parametrów procesowych (ciśnienia roboczego)

i konstrukcyjnych (objętości zespołów funkcjonalnych instalacji pneumatycznej, powierzchni przekrojów przewodów sieciowych, zaworu i otworu strzałowego oraz odpowietrzeń). Prace Orłowa [95, 96] i Matwiejenki oraz współautorów [90] uwzględniające modele reologiczne w opisie dynamicznego zagęszczania masy stanowiły istotną nowość. W pracach [57, 63, 85] zastosowano modelowanie zjawiska filtracji powietrza przez masę zawartą w komorze nabojoyej, z wykorzystaniem analogowych modeli elektrycznych. Ważne prace na tym polu stanowią publikacje [3, 65], w których na podstawie obliczeń Leibensona i modelowania numerycznego dokonano między innymi identyfikacji kształtu powierzchni izobarycznych oraz linii prądu strumienia powietrza w strefie otworu wylotowego [31]. Uwzględnione zostały elementy teorii podobieństwa do modelowania i opisu procesu dla różnych warunków doprowadzenia powietrza do masy. W opisie modelowania zjawisk przepływowych (w procesach dmuchowych) wykorzystano teorię przepływu cieczy i gazów w ośrodku niepodlegającym odkształceniu.

- **prace związane z weryfikacją doświadczalną modeli i technik obliczeniowych procesu dmuchowego** w zastosowaniu do tworzyw (mas) rdzeniowych o różnej charakterystyce reologicznej i technologicznej. Szereg prac najnowszych koncentruje się na zastosowaniu komputerowych technik obliczeniowych do opisu i optymalizacji procesu zapełniania rdzennicy i utwardzania masy, podejmując próby adaptacji do tego celu istniejących programów symulacyjnych 3D. Publikacje [37, 73] obejmowały podstawowe elementy teorii procesu dmuchowego. Dotyczące modelowania i symulacji komputerowej. Statystyczne metody opracowania danych doświadczalnych i ustalania równań regresji wiążących badane wielkości procesu znajdują odzwierciedlenie w publikacjach Macaška i Čecha [89] oraz innych autorów młodszej generacji [42, 45, 48]. Również część nowszych i bieżących badań wykonanych w ramach realizacji projektu badawczego NCN [42, 45, 48, 108] oraz realizowanych w AGH [9, 29, 47, 49] i obcych [53, 54, 55] wnosi do stanu zagadnienia aspekt badań modelowych i symulacyjnych, odwzorowujących określone sytuacje technologiczne, odnośnie do rodzaju masy, wartości parametrów procesowych obejmujących: ciśnienie, średnice otworów strzałowych (dmuchowych) oraz ilość i usytuowanie odpowietrzeń.

- **prace związane z konstrukcją i diagnostyką zespołów roboczych maszyn.**

Trzeba zaznaczyć, że zagadnienia badawcze z zakresu konstrukcji nadmuchiwarek, strzelarek i badań prototypów stanowią najmniej liczną część publikacji, co niewątpliwie jest związane z obawą ujawnienia tajemnic budowy tych maszyn przed konkurencją i ochrony zastrzeżonych w licznych opisach patentowych z tego okresu. Szczególnie szczelne są w tym zakresie informacje w publikacjach firm zachodnich, w których nad informacjami technicznymi dominują aspekty reklamowe. Dostępne publikacje podejmują zagadnienia korzystnych rozwiązań sposobu doprowadzenia powietrza do masy w komorze naboju [2, 5, 20, 65, 73, 81, 85, 102], doboru zaworu do wielkości maszyny [68, 89, 103, 112] i kształtowania parametrów konstrukcyjnych przegrody perforowanej [8, 14, 16, 20, 22, 23], czy eliminowania negatywnych skutków fali uderzeniowej, pojawiającej się przy bardzo szybkim otwieraniu zaworu strzałowego, które prowadzili Fiszkin i współautorzy [23, 26] oraz Aronsztejn i Mardonow [4]. Już od końca lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia ostatecznie różnicuje się konstrukcja maszyn stosowanych w produkcji masowej rdzeni z różnych rodzajów masy rdzeniowej [25, 64, 68, 69, 76, 78] oraz ustala się zbliżony poziom produkowanych maszyn oceniany od strony użytkowników [25, 78].

3.2. Podsumowanie analizy stanu badań klasycznych odmian procesu dmuchowego

W podsumowaniu istniejącego stanu badań można uwzględnić dwa następujące aspekty:

- a) Ogólnej oceny stanu i zawartości tematycznej prac dostępnych w literaturze w ujęciu uniwersalnym dotyczącym:
 - elementów poznawczych publikacji, w tym informacji o mechanizmie procesów występujących w istniejących odmianach procesu,
 - opisów aplikacji pneumatycznego wytwarzania rdzeni i form metodami nadmuchiwania i wstrzeliwania w technologiach tzw. klasycznych mas rdzeniowych i formierskich (masy olejowe, masy formierskie z lepiszczem bentonitowym) w szerokim zakresie wartości ciśnienia,

- możliwości rozszerzenia maszyn dmuchowych do technologii rdzeni z mas rdzeniowych nowej generacji, dających procesowe połączenie operacji zapełniania wnęki technologicznej masą, zagęszczenia masy o kontrolowanym zakresie gęstości upakowania ziaren (zagęszczenia) oraz stanowiskowego lub poza stanowiskowego utwardzania masy za pomocą czynników fizycznych (nagrzewanie kontaktowe w rdzennicy, nagrzewania przedmuchem gorącego powietrza, nagrzewania bezkontaktowe w podczerwieni i mikrofalowego). Do tej grupy trzeba zaliczyć już istniejące możliwości utwardzania chemicznego mas ze spoiwami organicznymi i nieorganicznymi.

b) Informacji z literatury bezpośrednio związanych z tematem rozprawy i zawartością merytoryczną prób i badań bezpośrednio związanych z tematem rozprawy, które można następująco sformułować:

Aktualnie jedynie w maszynach formierskich jest stosowana technika ciśnienia o wartości poniżej ciśnienia atmosferycznego ułatwiająca zapełnianie wnęk technologicznych (górnej i dolnej połówek skrzyń formierskich) metodą zbliżoną do zasysania masy formierskiej i jej lepsze dociśnięcie do dwustronnej płyty modelowej, w której od strony górnej oraz dolnej jest rozmieszczony system powierzchni odpowietrzających. W wyniku stworzonego gradientu ciśnienia do obu powierzchni płyty modelowej zostaje „przyssana” warstwa masy uprzednio wprowadzona do przestrzeni technologicznej w stanie spulchnionym. Odciąg powietrza do zespołu próżniowego przez powierzchnie w płycie modelowej powoduje powstanie warstwy masy wstępnie zagęszczonej, która dobrze odwzorowuje kształt i wymiary zespołu modelowego. Ruch masy ma charakter przemieszczania pionowego skierowanego w stronę płyty modelowej. Nie są stosowane rozwiązania z systemem podciśnieniowego zagęszczania wstępnego masy w formach o pionowej płaszczyźnie podziału. Wartość zagęszczenia finalnego masy jest w przypadku poziomej płaszczyzny podziału form uzyskiwana przez doprasowanie do płyty całej objętości masy formierskiej wypełniającej obie połówki formy. Odbywa się to za pomocą zespołów, o napędzie mechanicznym, a najczęściej hydraulicznym, niekiedy wspomaganych wibracją. Procesy podciśnieniowe występują w urządzeniach znanych na rynku producentów maszyn

formierskich takich jak: Disa Forma, Kunkel Wagner- Vacupress, Haflinger. Zastosowanie podciśnienia w maszynach rdzeniarskich nie znalazło praktycznego potwierdzenia.

Z dostępnej literatury i materiałów badawczych zestawionych dalej w analizie bibliografii (rozdział 2) można wnioskować, że w przypadku bardzo złożonych rdzeni uzyskanie dobrego efektu zagęszczenia masy przekładającego się po utwardzeniu na uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości w tych rejonach rdzeni, które odwzorowują wewnętrzne przestrzenie konstrukcyjne rdzennic często trudne do zapełnienia masą, samo operowanie wartościami nadciśnienia nie zawsze jest wystarczające. Rozwiązania z podciśnieniowym sposobem zapełniania wnęk rdzennic wielokomorowych mogą potencjalnie rozwiązać szereg problemów technicznych występujących w konwencjonalnych technologiach dmuchowych. Najczęściej oznaczać to może odejście od stosowania głowic dmuchowych z centralnym otworem wylotowym na rzecz wielootworowych głowic i autonomicznego systemu odpowietrzeń. Sposoby wspomagania podciśnieniowego w sposób naturalny są w stanie wyeliminować trudności związane z zawisaniem i ewakuacją masy ze zbiornika do głowicy i wnęki technologicznej, przy czym ulega zwiększeniu równomierny rozkład i wstępny stopień upakowania ziaren we wnęce. Pod wpływem różnicy ciśnienia, w wyniku kierowanej filtracji powietrza, następuje frontalne przemieszczanie i zagęszczanie warstw masy wprowadzanych i pozostających we wnęce. To stanowi lepsze warunki zagęszczania tzw. dogęszczania masy przez wstrzelenie jej dodatkowej porcji w procesie realizowanym już w sposób konwencjonalny, przy czym przy pojedynczym otworze stalowym nie należy oczekiwać całkowitego usunięcia anizotropii zagęszczenia w osi rdzenia w stosunku do jego dalszych rejonów. W tych przypadkach coraz częściej stosuje się komputerowe systemy symulacji zapełnienia rdzennic analogiczne do znanych systemów symulacji zalewania, dominujących głównie przy odlewaniu w formach stałych (formy ciśnieniowe, kokile), co w praktyce wytwarzania różnych wielkości może napotykać na bariery o charakterze technologiczno-ekonomicznym.

4. Uzasadnienie wyboru tematu

W dążeniu do wytwarzania rdzeni o podwyższonej jakości, powstała koncepcja stanowiąca główny cel rozprawy, polegająca na zastosowaniu wspomaganie zasadniczego procesu nadciśnieniowego poprzez włączenie do konstrukcji rdzennicy układu z instalacją podciśnienia. Rolą wspomaganie podciśnieniem, jest zwiększenie skuteczności odpowietrzania rdzennicy w miarę jej zapełniania i usuwania „poduszek powietrza” w zakamarkach i elementach konstrukcyjnych o charakterze przeszkód dla przemieszczanego strumienia masy wraz z powietrzem. W tych przypadkach konieczne jest wykorzystanie tak zwanych quasi-hydraulicznych właściwości strumienia piaskowo-powietrznego upodabniających jego zachowanie do cieczy i rozbudowanie systemu przepływu powietrza i masy we wnęce rdzennicy przez stosowanie wielootworowych głowic strzałowych i powiązanych z nimi złożonych systemów odpowietrzenia. W tradycyjnym rozwiązaniu technologii nadmuchiwania i wstrzeliwania rdzeni rolę odpowietrzników spełniają korki odpowietrzające umieszczone w rdzennicy połączone z atmosferą, które tracą dużą część swojej skuteczności w wyniku zasłaniania przez narastające warstwy zagęszczanej masy rdzeniowej.

Innowacyjne rozwiązanie, które jest tematem rozprawy polega na integracji dwóch wskazanych wyżej sposobów postępowania, polegającym na równoczesnym lub z minimalnie zróżnicowaną inicjacją obu systemów zapełniania, przemieszczania i zagęszczania masy we wnęce technologicznej (rdzennica, skrzynia formierska). W pracy zostanie podjęte postępowanie obejmujące opracowanie, wyposażenie badawcze stanowiska i przeprowadzenie szerokiego zakresu badań ważnych do wprowadzenia tej technologii na przykładzie technologii rdzeni.

W procesie dmuchowym z kontrolowanym podciśnieniem w rdzennicy istotna jest jego wartość, odpowiedzialna za możliwy do uzyskania gradient ciśnienia działającego na ruch masy, dobrana stosownie do ilości masy z uwzględnieniem objętości komór technologicznych. W znacznym stopniu może ona wpłynąć, na jakość rdzenia poprzez zwiększoną precyzję odwzorowania odtwarzanego w rdzennicy kształtu. W tym przypadku oczekuje się, że zassanie masy do wnęki technologicznej zapewni całkowite jej zapełnienie i wstępne zagęszczenie (*ang. predensening*). W tym przypadku, gdy masa może być dostarczana do wnęki rdzennicy przez wiele

odpowiednio rozmieszczonych otworów dmuchowych (a właściwie zasysających w tej fazie procesu), zagęszczanie wewnątrz komory technologicznej przebiega w trakcie jednego cyklu i następuje jednocześnie w całej objętości. ***Oznacza to, że narastanie warstwy masy i budowa struktury zagęszczania odbywa się od strony otworów odpowietrzających, gdzie występuje największy gradient ciśnienia.*** Zatem można wnioskować, że w trakcie procesu następuje wzajemne oddziaływanie poszczególnych warstw zorientowane zgodnie z kierunkiem działania gradientu ciśnienia.

To spostrzeżenie ma charakter hipotetyczny i powinno być zweryfikowane w toku badań stanowiskowych o poszerzonym programie, gdyż jest to warunkiem zastosowania w produkcji rdzeni technologii procesu podciśnieniowego, którego walory zostały dostrzeżone w urządzeniach formierskich niektórych znanych firm, natomiast brak doniesień literaturowych świadczących o podobnych aplikacjach dotyczących rdzeni.

Wyniki z dotychczasowych badań laboratoryjnych prowadzonych na Wydziale Odlewnictwa AGH potwierdzają możliwości przeprowadzenia odnośnych badań stanowiskowych o poszerzonym programie merytorycznym. Wyniki badań z pełną analizą ich przydatności do rozwoju technologii prezentowane były w publikacjach naukowych, materiałach konferencyjnych i opracowaniach niepublikowanych (przykładowo: Monografia R.Dańko, Procesy dmuchowe i maszyny w technologiach wytwarzania rdzeni odlewniczych; praca doktorska M.Ślęzyk, Analiza i modelowanie systemu formowania podciśnieniowego).

Z tych względów temat został sformułowany następująco: ***Zintegrowany proces wykonywania rdzeni odlewniczych metodą dmuchową z zastosowaniem obniżonego ciśnienia odpowietrzenia rdzennicy.*** Stosownie do tematu został opracowany program badawczy i włączony do niniejszej pracy. W programie badawczym wprowadzono określenie „zintegrowany proces”, co jednoznacznie wskazuje na łączne zastosowanie nadciśnienia i podciśnienia.

Badania prowadzone w byłej Katedrze Maszyn i Urządzeń Odlewniczych, a następnie po zamianach organizacyjnych, w Katedrze Inżynierii Procesów Odlewniczych na Wydziale Odlewnictwa AGH, stwarzają realne podstawy do zaprojektowania i wykonania stanowiska modelowego do zintegrowanego procesu wykonywania rdzeni metodą nadciśnienia i podciśnienia. Dla celów badawczych zostało przygotowane stanowisko zbudowane z zespołów, którymi były: sprężarka,

zbiornik wyrównawczy, stanowiący bufor sprężonego powietrza, zawór strzałowy o sterowanym czasie otwarcia, komora nabojoya (tuleja strzałowa) z badaną masą rdzeniową, rdzennica oraz instalacja pomiarowa wraz z czujnikami ciśnienia umieszczonymi w komorze nabojoyej i rdzennicy.

5. Założenia i program tematyczny rozprawy

Podstawowym założeniem rozprawy pracy jest opracowanie modelu zagęszczania masy metodami dmuchowymi (nadmuchiwanie, wstrzeliwanie) w warunkach pojedynczych procesów „cząstkowych”, nadciśnienia i podciśnienia. W procesie zintegrowanym następuje oddziaływanie ciśnienia, którego gradient jest stymulowany zarówno w zakresie wartości powyżej ciśnienia otoczenia, jak również w zakresie poniżej ciśnienia otoczenia. Funkcjonalnie te dwa autonomiczne zakresy są związane z dwoma odrębnymi źródłami (zasobami) czynnika napędowego, którymi są:

- w układzie zasilania nadciśnienia - sprężone powietrze (sieć, zbiornik wyrównawczy),
- w układzie zasysania podciśnieniowego (zbiornik próżniowy i pompa próżniowa).

Termin integracja jest traktowany umownie i nie determinuje szczegółowo sekwencji wspólnego oddziaływania na procesy zapełniania, przemieszczania i zapełniania masy w rdzennicy, które mogą uwzględniać wynikające z doświadczeń momenty ich włączania do wspólnego cyklu czasowego.

Połączenie dwóch procesów powinno wpłynąć korzystnie na jakość wykonywanych rdzeni pod względem zwiększonego stopnia zagęszczenia i jednorodności masy w całej objętości rdzenia. Konsekwencją łącznego przebiegu obu składowych procesu powinno być dążenie do udoskonalenia maszyn dmuchowych powszechnie stosowanych w przemyśle odlewniczym z pewną perspektywą stosowania mniejszych wartości nadciśnienia z korzyścią dla trwałości oprzyrządowania odlewniczego oraz energochłonności procesu.

Jako podstawa do badań własnych przewidzianych w niniejszej pracy wytypowano istniejące stanowisko w laboratorium Katedry Inżynierii Procesów Odlewniczych WO AGH, na którym prowadzone były dotychczasowe badania procesów dmuchowych. Zakładając, że badania będą dotyczyły zintegrowanego procesu nadciśnienia i podciśnienia, głównym celem będzie przeprojektowanie istniejącego stanowiska i dostosowanie go do badań wstępnych i zasadniczych stosownie do nowego programu badań.

Zakres ogólny badań realizowanych na zmodernizowanym stanowisku doświadczalnym uwzględnia:

- sporządzenie charakterystyki przepływu samego powietrza w zakresie powyżej ciśnienia otoczenia (bez udziału masy) w zespołach funkcjonalnych zespołu obejmującego w drodze: sieć, zbiornik wyrównawczy, zawór strzałowy, komora nabojowa, rdzennica,
- badanie procesu wypełniania rdzennicy strumieniem powietrzno-piaskowym metodą nadciśnienia,
- sporządzenie charakterystyki przepływu samego powietrza w zakresie poniżej ciśnienia otoczenia (bez udziału masy) w zespołach funkcjonalnych zespołu zasysania próżniowego obejmującego przepływy na drodze: zbiornik próżniowy, zawór próżniowy, rdzennica, komora nabojowa,
- badanie procesu wypełniania rdzennicy strumieniem powietrzno-piaskowym metodą podciśnienia,
- badanie procesu wypełniania rdzennicy strumieniem powietrzno-piaskowym metodą zintegrowanego nadciśnienia z podciśnieniem.

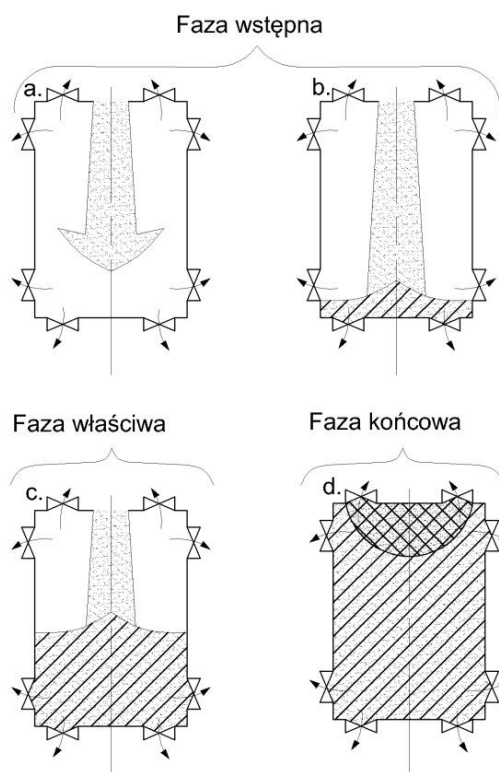
Wyniki z badań wstępnych będą podstawą do przygotowania programu badań technologicznych. Oznacza to, że w badaniach technologicznych uwzględnione będzie stosowanie określonej masy rdzeniowej traktowanej, jako masa referencyjna, jako materiału do wykonywania rdzeni. Program badań obejmować będzie następujące elementy postępowania:

- zastosowanie pozyskanej z literatury lub z innych badań informacji technicznych stanowiące przesłanki do opracowania własnej koncepcji stanowiska doświadczalnego do przeprowadzenia procesu zintegrowanego i stworzenia warunków dla konkretnego układu technicznego zastosowania nadciśnienia i podciśnienia,
- wirtualna analiza zintegrowanego procesu i możliwości zastosowania,
- opracowanie programu badań i wariantów pomiarowych z masą i bez masy rdzeniowej oraz metodyki wykonywania prób wraz z dokumentacją wyników,
- realizacja programu badań w warunkach laboratoryjnych,
- analiza wyników badań i wnioski do opracowania zaleceń projektowych stanowiska pilotowego.

6. Analiza modeli procesów dmuchowych w ujęciu klasycznym

Procesy dmuchowe polegają na przemieszczaniu się określonego strumienia powietrza pomiędzy przestrzeniami technologicznymi w ściśle określonych układach pneumatycznych. Charakteryzowane są następującymi parametrami: ciśnienie robocze w przestrzeniach technologicznych rdzennicy i instalacji pneumatycznej, wielkości charakteryzujących przepływy, takie jak właściwości hydrodynamiczne strumienia dwufazowego, gęstość gazu, prędkość strumienia powietrzno-masowego, czas przebiegu procesu, itp..

Z dostępnych opracowań wyłania się najbardziej ogólne ujęcie charakteru kinetyczno-fizyczne procesu z podziałem na charakterystyczne fazy występujące w napełnianiu i zagęszczaniu rdzennic masą rdzeniową. Schematycznie fazy zilustrowano na rysunku 2.



Rys. 2. Charakterystyczne fazy przebiegu zapełniania wnętrza rdzennicy masą rdzeniową w procesie dmuchowym [36].

Wyróżnia się następujące fazy:

- a) faza wstępna, której najważniejszym parametrem decydującym o zagęszczeniu i wypełnieniu rdzennicy masą rdzeniową jest energia kinetyczna strugi piaskowo-powietrznej. W fazie tej występuje początkowy stan inicjacji zapełnienia i stan właściwego zapełniania rdzennicy,
- b) faza właściwa, w której następuje zaawansowany quasi–ustalony wypływ strumienia piaskowo powietrznego, tworzenie struktury zagęszczenia i osiowo symetryczny rozpływ masy,
- c) faza końcowa, następuje gwałtowna utrata swobody wypływu strumienia piaskowo powietrznego i wzrost oporów przepływu na skutek zapełniania masą.

W układzie przestrzennym podłączenia elementów tworzących spójny system w kolejności procesowej wyróżnia się:

- instalację rurową, jako połączenie ze zbiornikiem buforowym sprężonego powietrza,
- zawór strzałowy otwierający dynamicznie przepływ sprężonego powietrza do zbiornika wewnętrznego,
- zbiornik wewnętrzny o określonej objętości, w którym następuje wzrost ciśnienia powietrza i moment rozpoczęcia procesu wstrzeliwania,
- komora nabożowa wypełniona masą rdzeniową o objętości określonej w stosunku do wielkości odtwarzanego rdzenia,
- otwór strzałowy inicjujący proces transportu masy do rdzennicy,
- rdzennica, jako przestrzeń technologiczna odtwarzająca kształt rdzenia,
- odpowietrzniki pełnią rolę otworów, przez które wypływa sprężone powietrze w trakcie wypełniania wnęki rdzennicy,
- atmosfera; otoczenie stanowiska strzelarki.

Z analizy dostępnych opracowań autorskich [2, 13, 16, 116] wynika, że w modelach parametry konstrukcyjne są przypisane do kolejnych elementów tworzących zintegrowany układ. Jest to uzasadnione, ponieważ, w tych miejscach występują zjawiska wpływające na kinetyczno-dynamiczny przepływ strumienia powietrznego i kolejno strumienia powietrzno-piaskowego (masy rdzeniowej).

W modelach opisy parametryczne dotyczą:

- instalacji rurowej; średnica, długość instalacji, przekrój rzeczywisty,

- zaworu strzałowego pneumatycznego; szybkość otwarcia, skok, przekrój,
- zbiornika wewnętrznego; objętość stanowiąca część komory naboowej nie wypełnionej masą rdzeniową,
- komory naboowej; objętość wypełniona masą w ilości, stosownie do objętości rdzenia,
- otworu strzałowego; przekrój, jest to wartość będąca w funkcji z wydajnością wypływu strumienia piaskowo powietrznego z komory naboowej do rdzennicy,
- powierzchni czynnej odpowietrzeń rdzennicy; suma przekrojów powierzchni otworów tzw. korków odpowietrzających.

Intensywność przebiegu procesu dmuchowego od chwili utworzenia strumienia piaskowo powietrznego ulega stałemu zmniejszeniu się w wyniku wzrostu ciśnienia we wnętrzu rdzennicy. Świadczy to o zaburzeniu bilansu ilości powietrza dostarczanego z masą przez otwór dmuchowy oraz ilości powietrza opuszczającego wnękę przez otwory odpowietrzające rozłożone na ścianach rdzennicy.

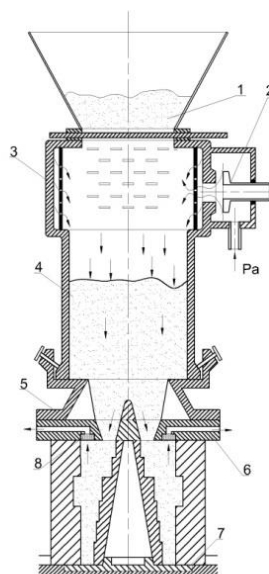
Prędkość wypływu powietrza z komory naboowej do rdzennicy nie jest hamowana przez zwiększające się ciśnienie w rdzennicy do momentu aż osiągnie ono wartość, tak zwanego w aerodynamice **ciśnienia krytycznego** w stosunku do ciśnienia w komorze naboowej [50 str.56].

W ogólności krytyczny stosunek ciśnień w rdzennicy (p_c) i w komorze naboowej (p_b) przy założeniu adiabatycznej przemiany określa wzór (5) [50]:

$$\left(\frac{p_c}{p_b}\right)_{\text{kryt}} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = 0,528; \text{ zatem } (p_c)_{\text{kryt}} = 0,528 \cdot p_b \quad (5)$$

Istotą każdego zapisu modelowego jest parametryzacja dynamiki procesu zależna od zastosowanych w układzie technologicznym elementów konstrukcyjnych. W praktyce rozróżnia się dwa typy urządzeń: nadmuchiarki i strzelarki.

Schemat nadmuchiarki do wykonywania rdzeni przedstawiono rysunku 3.



Rys. 3. Schemat klasycznej nadmuchiarki do rdzeni [100,101]: 1 - zasobnik masy rdzeniowej, 2 - zawór dmuchowy, 3 - komora nabojowa, 4 - masa rdzeniowa, 5 - głowica dmuchowa, 6 - górna płyta odpowietrzająca, 7 - podstawa rdzenia, 8 - rdzennica.

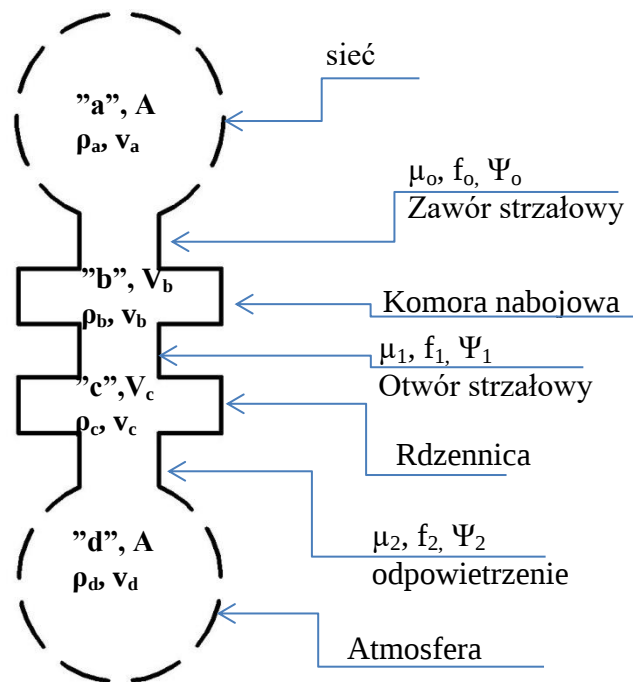
Nadmuchiarki stosowane w przemyśle do wykonywania rdzeni składają się z komory nabojowej (3) wypełnionej masą rdzeniową, nad którą zainstalowany jest zasobnik masy rdzeniowej (1) oddzielony szczelną zasuwą nożową. Sprężone powietrze dostarczane jest przez zawór dmuchowy (2) do komory nabojowej nad górną powierzchnię masy rdzeniowej. Różnica ciśnień delta Δp , wywołana pomiędzy słupem masy w komorze i w rdzennicy „uruchamia” filtrację masy przez powietrze, która przedostaje się z komory nabojowej (3) przez głowicę dmuchową (5) do rdzennicy (8). Następnie powietrze wypływa na zewnątrz do atmosfery przez odpowietrzniki umiejscowione w górnej płycie (6). Wraz z powietrzem transportowana jest masa rdzeniowa, wypełniającą wnękę rdzennicy.

Zasadę pracy strzelarki do wykonywania rdzeni przedstawiono na rysunku 4.

6.1. Model procesu nadciśnieniowego – klasyczny model P.N.Aksjonowa i jego rozwiązania

Podstawowy model opisujący proces nadciśnieniowy w maszynach dmuchowych ze stałym skokiem zaworu strzałowego został opracowany przez P.N.Aksjonowa [2]. W modelu tym zastosowano równanie Saint Venanta-Wantzela [107] służące do obliczenia przyrostu masy powietrza w przestrzeni roboczej zwanej komorą nabojową, intensywności zmiany ciśnienia w określonym czasie przebiegu procesu. Zgodnie z modelem przedstawionym na rysunku 5 uwzględnione przez autora modelu połączenie dwóch komór roboczych nabojowej oraz przestrzeni technologicznej rdzennicy zostało opisane wzorem (5).

Model Aksjonowa uważany jest za model klasyczny nadmuchiwarek, w którym autor uprościł obliczenia, uwzględniając wyłącznie relacje pomiędzy dwoma komorami roboczymi. Nie uwzględnienie w podejściu analitycznym zbiornika wewnętrznego oraz komory przyzaworowej, wynikało z konstrukcji przyjętego do badań urządzenia.



Rys. 5. Model obliczenia strumienia powietrznego w maszynach dmuchowych [2] klasyczny Aksjonowa. Oznaczenia: *s* - sieć sprężonego powietrza, *a* - komora nabojowa, *c* - rdzennica, *d* - atmosfera, μ , f , Ψ - wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.

Wzór opisujący model Aksjonova – równanie Saint Venant’a-Wantzela zastosowane do obliczenia prędkości wypływu u_k z komory jest następujący:

$$u_k = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (6)$$

w którym:

p_0 – ciśnienie spiętrzenia panujące w zbiorniku, MPa

ρ_0 – gęstość gazu w zbiorniku, kg/m³

p_k – ciśnienie w przekroju wypływu, MPa

k – wykładnik adiabaty

Podstawową zależnością we wzorze (6) jest iloraz ciśnienia (p_k) w przekroju wypływu i ciśnienia zasilającego (p_0). Iloraz charakteryzuje środowisko, w którym zachodzi proces przemiany adiabatycznej.

Kolejnym parametrem oddającym istotę procesu jest wydatek masowy powietrza. Wydatek jest to ilość powietrza, która przepływa przez otwór łączący dwa sparametryzowane środowiska. W procesie dmuchowym zdefiniowany otwór należy postrzegać, jako otwór łączący przestrzeń, przez którą przepływa strumień powietrza z przestrzeni nad ciśnieniowej do przestrzeni o niższym ciśnieniu.

Wydatek masowy wypływu powietrza przez otwór wyraża się wzorem:

$$G = \rho_k \cdot u_k \cdot A_k \quad (7)$$

gdzie:

ρ_k - gęstość gazu w przekroju wylotu, kg/m³

u_k - prędkość w przekroju wylotu, m/s

A_k - przekrój wylotu, m²

We wzorze (7) uwzględniony jest przekrój wylotu zależny od geometrii otworu.

Ważnym czynnikiem decydującym o klasyfikacji rodzajów przepływu rozgraniczającym przepływ nadkrytyczny i krytyczny, w których prędkość wypływu ośrodka gazowego jest równa prędkości dźwięku w danym ośrodku, od przepływów podkrytycznych, dla których ta prędkość jest mniejsza i może być obliczana ze wzoru (5).

Prędkość wypływu powietrza z komory nabojoyej do rdzennicy nie jest hamowana przez zwiększające się ciśnienie w rdzennicy do momentu, aż osiągnie ono wartość, tak

zwanego w aerodynamice ciśnienia krytycznego w stosunku do ciśnienia w komorze nabojoyej.

W ogólności krytyczny stosunek ciśnień w rdzennicy (p_c) i w komorze nabojoyej (p_b), przy założeniu adiabatycznej przemiany określa wzór:

$$\left(\frac{p_c}{p_b}\right)_{\text{kryt}} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = 0,528; \text{ zatem } (p_c)_{\text{kryt}} = 0,528 \cdot p_b \quad (8)$$

Utrzymanie ciśnienia w rdzennicy poniżej wartości ciśnienia krytycznego jest możliwe poprzez właściwe odpowietrzenie rdzennicy, przez co należy rozumieć zarówno dobór sumarycznej powierzchni otworów odpowietrzających (płyt, wkładek lub innych rozwiązań konstrukcyjnych spełniających tę funkcję) w relacji do powierzchni otworów dmuchowych, ale także rozmieszczenie ich we wnętrzu rdzennicy.

Graniczną wartość ciśnienia w rdzennicy można obliczyć z wzorów (9) i (10) w zależności, od którego ciśnienia ta wartość jest liczona. Jeżeli ciśnieniem odniesienia jest ciśnienie graniczne w komorze nabojoyej (p_b^{gran}) to wzór ma postać:

$$p_b^{\text{gran}} = p_a^{\text{gran}} \left(\frac{\psi_o \mu_{of_o}}{\psi_1 \mu_{1f_1}} \right) [\text{MPa}] \quad (9)$$

W drugim przypadku, gdy ciśnienie w rdzennicy jest określane względem ciśnienia w zbiorniku wyrównawczym maszyny (p_a^{gran}) wzór jest następujący:

$$p_c^{\text{gran}} = p_a^{\text{gran}} \left(\frac{\psi_o \mu_{of_o}}{\psi_2 \mu_{2f_2}} \right) [\text{MPa}] \quad (10)$$

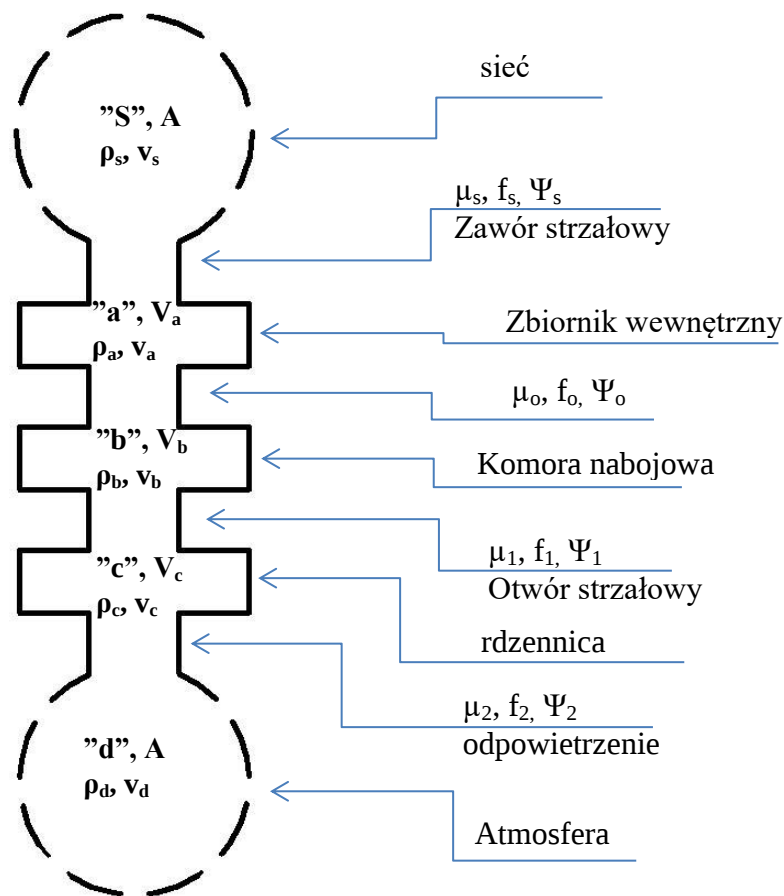
Do określenia wartości ciśnienia granicznego w komorze nabojoyej (p_b^{gran}) względem ciśnienia w zbiorniku wyrównawczym służy wzór:

$$p_c^{\text{gran}} = p_b^{\text{gran}} \left(\frac{\psi_1 \mu_{1f_1}}{\psi_2 \mu_{2f_2}} \right) [\text{MPa}] \quad (11)$$

6.2. Rozszerzony model procesu wstrzeliwania masy w układzie powyżej ciśnienia atmosferycznego

W wyniku zaprojektowania nowoczesnych maszyn dmuchowych – strzelarek, o zwiększonej efektywności zagęszczania masy, nastąpił rozwój badań dotyczących przepływu powietrza w elementach składowych konstrukcji. Przykładem jest

rozszerzony model J. Dańko [40], w którym Autor uwzględnił dodatkowo zmiany zachodzące w procesie przepływu pomiędzy przestrzeniami roboczymi w instalacji. Podstawą do rozważań analitycznych był model klasyczny P.N. Aksjonowa. Rozważania podjęte przez J. Dańko uwzględniały zbiornik wewnętrzny o określonej objętości potrzebnej do prawidłowego prowadzenia procesu maszyny oraz ujmowały zmienną wartość ciśnienia w układzie pneumatycznym. Nowością było uwzględnienie przestrzeni przyzaworowej o ciśnieniu absolutnym. Na rysunku 6 przedstawiono istotę analizowanego modelu.



Rys. 6. Model obliczenia strumienia powietrznego w maszynach dmuchowych[36] rozszerzony dla nadmuchiwarek wg. J. Dańko. Oznaczenia: *s* - sieć sprężonego powietrza, *a* - zbiornik wewnętrzny maszyny, *b* - komora nabojoowa, *c* - rdzennica, *d* - atmosfera, μ, f, Ψ - wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.

Zależności opisujące chwilowe zmiany masy powietrza w przestrzeniach „a” i „c” zachowują bez zmian sposób obliczenia modelu rozszerzonego podany wzorami (12) i (13), natomiast wzór (13), który dotyczy komory nabojoyej, został zastąpiony dwoma nowymi zależnościami, z których pierwsza służy do określenia chwilowej zmiany masy powietrza w przestrzeni przy zaworowej „p”, a druga - wartości chwilowej ciśnienia właściwej komorze nabojoyej „b”:

$$dG_p = (\mu_0 \cdot f_0 \cdot \Psi_0 \sqrt{\frac{P_a}{V_a}} - \mu_p \cdot f_{pc} \cdot \Psi_p \sqrt{\frac{P_p}{V_p}}) d\tau \quad (12)$$

$$dG_b = (\mu_p \cdot f_{pc} \cdot \Psi_p \sqrt{\frac{P_p}{V_p}} - \mu_1 \cdot f_1 \cdot \Psi_1 \sqrt{\frac{P_b}{V_b}}) d\tau \quad (13)$$

gdzie:

f_{pc} – całkowita powierzchnia szczelin w przegrodzie perforowanej,

μ_p – współczynnik wydatku otworu na stopniu $p \rightarrow b$.

Intensywność narastania ciśnienia w przestrzeni przyzaworowej „p”, poprzedzającej komorę nabojoyą określa wzór:

$$\frac{dp_p}{dt} = \frac{\kappa \cdot p_a^{\frac{1}{\kappa}} \cdot V_a}{V_p} \cdot p_p^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot (\mu_0 \cdot f_0 \cdot \Psi_0 \cdot \sqrt{\frac{P_a}{V_a}} - \frac{\mu_p \cdot f_{pc} \cdot \Psi_p}{\sqrt{p_a^{\frac{1}{\kappa}} \cdot V_a}} \cdot \sqrt{p_p^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}) \quad (14)$$

Intensywność narastania ciśnienia powietrza we właściwej komorze nabojoyej, stanowiącą jeden z najważniejszych parametrów procesowych podaje wzór:

$$\frac{dp_b}{dt} = \frac{\kappa \cdot p_a^{\frac{1}{\kappa}} \cdot V_p}{V_b} \cdot p_b^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot (\mu_p \cdot f_{pc} \cdot \Psi_p \cdot \sqrt{\frac{P_p}{V_p}} - \frac{\mu_1 \cdot f_1 \cdot \Psi_1}{\sqrt{p_p^{\frac{1}{\kappa}} \cdot V_p}} \cdot \sqrt{p_b^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}) \quad (15)$$

gdzie:

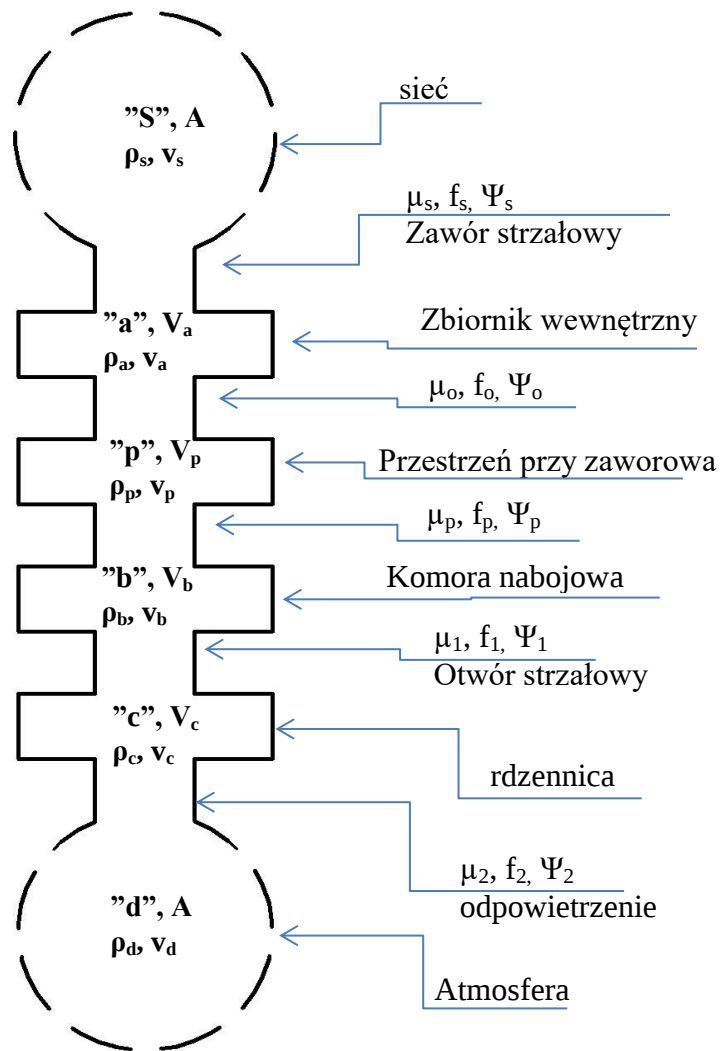
V_p - objętość przestrzeni przy zaworowej "p" ($V_p \approx 0,2 V_b$), m^3 ,

V_b - objętość komory nabojoyej, m^3 ,

Ψ_p - liczba przepływu dla przegrody perforowanej (stopień $p \rightarrow b$).

Kolejno na rysunku 7 przedstawiono rozszerzony model procesu zachodzącego w strzelarkach. Autor w swoich rozważaniach uwzględnił szeregowe połączenie instalacji pneumatycznej składającej się z:

- sieci - źródło sprężonego powietrza „s” o nieograniczonej pojemności $V_s = \infty$ i stałym ciśnieniu p_s ,
- zbiornika wewnętrznego maszyny „a” o objętości V_a i ciśnieniu p_a ,
- zaworu strzałowego - o stałym skoku i liniowej lub zmiennej charakterystyce otwierania,
- przestrzeni przyzaworowej - „p” o objętości V_p i ciśnieniu p_p ,
- komory nabojoyej - „b”, scharakteryzowaną przez objętość V_b i ciśnienie p_b ,
- rdzennicy - „c” o objętości V_c i ciśnieniu p_c ,
- atmosfery - otoczenia „d” ($V_d = \infty$, $p_d = \text{const}$).



Rys. 7. Model obliczenia strumienia powietrznego w maszynach dmuchowych [36] rozszerzony dla strzelarek wg. J.Dańko. Oznaczenia: s - sieć sprężonego powietrza, a - zbiornik wewnętrzny maszyny, p - przestrzeń przyzaworowa, b - komora nabojowa, c - rdzennica, d - atmosfera, μ, f, Ψ - wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.

Zależności podane w modelu dla strzelarek (rys.7) dotyczą chwilowej zmiany masy powietrza w analizowanych przestrzeniach mających wpływ na proces. Rozszerzony model uwzględnia określony moment działania czasowego zaworu strzałowego.

Wzory (16), (17), (18) odnoszą się do chwilowej zmiany masy powietrza w przestrzeniach „a”, „b” i „c”, które mają następującą postać:

$$dG_a = (\mu_s \cdot f_s \cdot \Psi_s \sqrt{\frac{p_s}{v_s}} - \mu_0 \cdot f_0 \cdot \Psi_0 \sqrt{\frac{p_a}{v_a}}) d\tau \quad (16)$$

$$dG_b = (\mu_0 \cdot f_0 \cdot \Psi_0 \sqrt{\frac{p_a}{v_a}} - \mu_1 \cdot f_1 \cdot \Psi_1 \sqrt{\frac{p_b}{v_b}}) d\tau \quad (17)$$

$$dG_c = (\mu_1 \cdot f_1 \cdot \Psi_1 \sqrt{\frac{p_b}{v_b}} - \mu_2 \cdot f_2 \cdot \Psi_2 \sqrt{\frac{p_c}{v_c}}) d\tau \quad (18)$$

gdzie:

f - powierzchnia przekroju analizowanego elementu instalacji pneumatycznej strzelarki: przewodu sieciowego (f_s), zaworu strzałowego (f_0), otworu wylotowego z głowicy dmuchowej (f_1), sumaryczna - otworów odpowietrzających w rdzennicy (f_2), m^2 ,

p - ciśnienie absolutne powietrza w przestrzeniach „a”, „b” i „c” maszyny,

v - objętość właściwa w przestrzeniach „a”, „b” i „c”, m^3 ,

$\Psi_s, \Psi_0, \Psi_1, \Psi_2$ - liczby przepływu na kolejnych stopniach przepływu powietrza,

$\mu_s, \mu_0, \mu_1, \mu_2$ - współczynniki wydatku otworów na kolejnych stopniach przepływu powietrza.

Rozszerzony model dla strzelarek wyrażony wzorami (16), (17), (18) oraz intensywność zmian ciśnienia w przestrzeni „a” obrazuje zależność charakteryzującą proces dmuchowy, którą jest szybkość narastania ciśnienia w przestrzeni technologicznej:

$$\frac{dp_a}{dt} = \frac{\kappa \cdot p_s^{\frac{1}{\kappa}} \cdot v_s}{V_a} \cdot p_a^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot (\mu_s \cdot f_s \cdot \Psi_s \cdot \sqrt{\frac{p_s}{v_s}} - \frac{\mu_0 \cdot f_0 \cdot \Psi_0}{\sqrt{p_s^{\frac{1}{\kappa}} \cdot v_s}} \cdot \sqrt{p_a^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}) \quad (19)$$

gdzie:

p_a - ciśnienie powietrza w przestrzeni technologicznej, MPa,

k - wykładnik adiabaty, ($\kappa=1,41$),

p_s - ciśnienie w zbiorniku, MPa,

v_s - objętość właściwa w przestrzeni technologicznej, m^3 ,

V_a - objętość przestrzeni technologicznej, m^3 ,

μ_s - współczynnik przepływu dla zaworu,

f_s - przekrój poprzeczny zaworu, m^2 ,

Ψ_s - funkcja wypływu sprężonego powietrza z zaworu,

V - objętość właściwa sprężonego powietrza w zbiorniku, m^3 ,

μ_0 - współczynnik przepływu przez otwory odpowietrzające,

f_0 - przekrój poprzeczny otworów odpowietrzających, m^2 ,

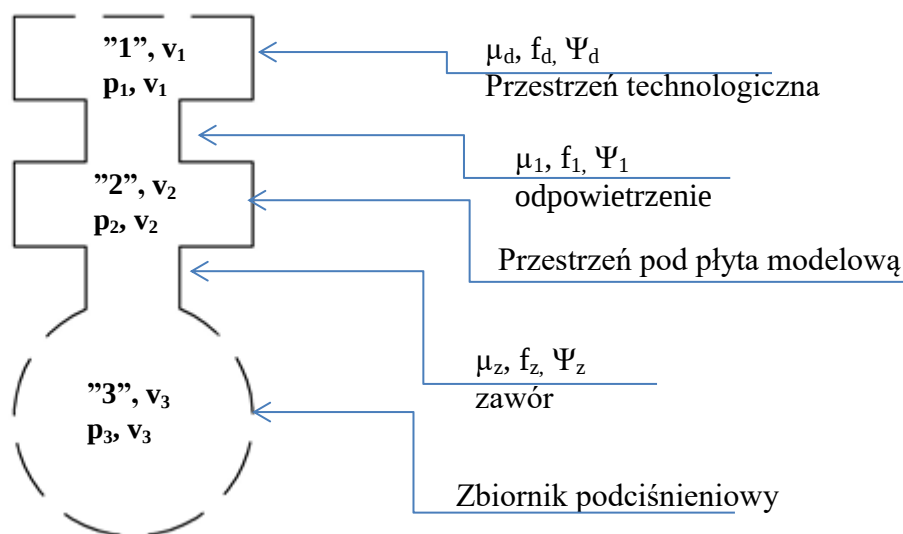
Ψ_0 - funkcja wypływu sprężonego powietrza z otworów odpowietrzających,

t - czas, s.

Model przepływu powietrza dla strzelarek może uwzględniać dodatkowo przestrzeń przyzaworową „p” oddzieloną przegrodą perforowaną od komory nabojoyej właściwej i w tej sytuacji analizowany, rozszerzony system obliczeń składa się z 6 połączonych szeregowo elementów pneumatycznych [36]. Zmienna wartość ciśnienia p_a określona we wzorze (19) w określonym przedziale czasowym uwzględnia objętość zbiornika zasilającego, akumulacyjnego V_a oraz wartość ciśnienia ze źródła sprężonego powietrza. Wzór również uwzględnia ubytek powietrza odprowadzanego do elementów układu maszyny przez zawór strzałowy [36]. We wzorach opisujących proces dmuchowy klasyczny oraz rozszerzony dla pozostałych przestrzeni występują współczynniki natężenia wypływu powietrza będące ilorazem rzeczywistego wydatku objętościowego do wydatku teoretycznego [50].

6.3. Jednowymiarowy przepływ quasi - ustalony - model procesu podciśnieniowego wg. M. Ślęzyka

Do stworzenia modelu przepływu strumienia powietrza w procesie podciśnieniowym posłużyły modele P.N. Aksjonowa [2] oraz rozszerzone modele J. Dańki [36]. W modelu procesu podciśnieniowego M. Ślęzyk [116] skorzystał z teorii jednowymiarowego przepływu quasi-ustalonego, zdefiniowanego przez E.W. Gerca [67]. Schemat modelu przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Model obliczenia strumienia powietrznego w formierce podciśnieniowej konwencji przedstawionej przez M.Ślęzyka [116]. Oznaczenia: a - przestrzeń technologiczna (rdzennica), b - przestrzeń pod płytą modelową, c - zbiornik podciśnieniowy, μ, f, Ψ - wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.

Proces przepływu powietrza jest scharakteryzowany zapisem zmian ciśnienia i temperatury w dowolnej przestrzeni rozpatrywanej instalacji [116]. Zmiany te uwzględnione są w równaniach (20) i (21):

$$\kappa R \left(\sum_{k=1}^n T_{i,k} dm_{i,k} - \sum_{l=1}^m T_{j,l} dm_{j,l} \right) = V_j dp_j + \kappa p_j dV_j \quad (20)$$

$$R \left[m_j dT_j + T_j \left(\sum_{k=1}^n dm_{i,k} - \sum_{l=1}^m dm_{j,l} \right) \right] = V_j dp_j + p_j dV_j \quad (21)$$

gdzie:

κ - wykładnik adiabaty ($\kappa=1,41$),

R - reakcja warstwy masy na część strumienia piaskowo-powietrznego ograniczoną płaszczyzną wylotu otworu strzałowego (R_k),

p_j, V_j - ciśnienie i objętość analizowanej przestrzeni,

$T_{j,k}$ - temperatura powietrza dopływającego ze źródła k do przestrzeni j ,

T_j - temperatura w przestrzeni j ,

dm_i, dm_j - zmiana masy powietrza w analizowanej przestrzeni związana z dopływem i odpływem powietrza.

Zapisy w lewej stronie w równaniach (20) i (21) oznaczają wpływ temperatury na zmiany objętości przepływającego powietrza w analizowanych przestrzeniach. Zapisy po prawej stronie dotyczą objętości komór roboczych o zmiennej objętości.

Autonomiczne traktowanie przedstawionego modelu instalacji podciśnieniowej uwzględnia parametry trzech komór a mianowicie:

1. przestrzeni technologicznej „1” o objętości v_1 i ciśnieniu p_1 ,
2. przestrzeni „2” pod płytą modelową o objętości v_2 i ciśnieniu p_2 ,
3. zbiornika podciśnieniowego „3” o objętości v_3 i ciśnieniu p_3 .

Zapis wzorów (21) i (22) odzwierciedla bilansowanie przepływu, przy czym w przestrzeni v_1 (rdzennica) ciśnienie jest równe ciśnieniu atmosferycznemu.

Parametry analizowanych komór zostały uwzględnione w równaniach (22), (23), (24), (25), (26) w następującej postaci:

- Bilans energii dla poszczególnych przestrzeni:

- przestrzeń „1”- „2”

$$-\kappa RT dm_{1/2} = v_1 dp_1$$

- przestrzeń „2”

$$\kappa RT (dm_{1/2} - dm_{2/3}) = v_2 dp_2 \quad (22)$$

- przestrzeń „3”

$$\kappa RT dm_{2/3} = v_3 dp_3$$

- Natężenie masowe strumienia powietrza:

$$dm_{1/2} = G_{1/2} \cdot dt \quad (23)$$

$$dm_{2/3} = G_{2/3} \cdot dt$$

- Warunki przepływu powietrza w zakresie nadkrytycznym i podkrytycznym, zgodnie z równaniem Saint Venanta-Wantzela dla przestrzeni oznaczonej „1”, „2”, „3” są zapisane wzorem:

$$\begin{aligned}
 G_{1/2} &= C_1 \cdot \mu_1 \cdot A_1 \cdot \frac{p_1}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}} & \text{dla } \frac{p_2}{p_1} > 0,528 \\
 G_{1/2} &= C_2 \cdot \mu_1 \cdot A_1 \cdot \frac{p_2}{\sqrt{T}} & \text{dla } \frac{p_2}{p_1} \leq 0,528
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 G_{2/3} &= C_1 \cdot \mu_2 \cdot A_2 \cdot \frac{p_2}{\sqrt{T}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{k+1}{k}}} & \text{dla } \frac{p_3}{p_2} > 0,528 \\
 G_{2/3} &= C_2 \cdot \mu_2 \cdot A_2 \cdot \frac{p_2}{\sqrt{T}} & \text{dla } \frac{p_3}{p_2} \leq 0,528
 \end{aligned} \tag{25}$$

Ważne jest, że model ten zakłada występowanie otwartej przestrzeni „1” od strony przeciwnej do zasysania (przestrzeń „3”).

- Charakterystyka zmian powierzchni zaworu odcinającego zbiornik próżniowy „3” od odpowietrzenia „2” i rdzennicy „1”. Zależność liniową otwierania zaworu próżniowego opisują wzory:

$$A_2(t) = a \cdot t \quad \text{dla } A_2(t) < A_2^{max} \tag{26}$$

$$A_2(t) = A_2^{max} \quad \text{dla } A_2(t) \geq A_2^{max}$$

C_1, C_2 – stałe

gdzie:

$p_{1,2,3}$ - wartość ciśnienia powietrza w danej przestrzeni,

κ - wykładnik adiabaty ($\kappa=1,41$),

$v_{1,2,3}$ - objętość danej przestrzeni (technologicznej, odpowietrzenia, przyzaworowej)

$\mu_{1,2}$ - współczynniki przepływu: odpowietrzeń i zaworu,

$A_{1,2}$ - powierzchnie przelotowe: odpowietrzeń i zaworu,

$dm_{i/j}$ - różniczkowa zmiana masy powietrza w danej przestrzeni,

$G_{i/j}$ - natężenie przepływu pomiędzy przestrzeniami,

T - temperatura,

t - czas.

W zapisie graficznym modelu indeksy a, b, c odpowiadają kolejno oznaczeniom 1, 2, 3 podanych we wzorach w postaci analitycznej (22), (23), (24), (25), (26).

Na podstawie przedstawionego modelu przy założeniach dotyczących rozpatrywanej instalacji jest możliwość oceny dynamiki procesu w funkcji zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

Założenia:

- stała objętość analizowanych przestrzeni,
- stała temperatura,
- stała czasowa otwarcia zaworu, (używane pojęcie stała czasowa oznacza osiągnięcie stanu ustalonego przez sygnał wyjściowy związana z czasem trwania stanu nieustalonego),
- pominięcie procesu zagęszczania.

Zastosowanie powyższych rozwiązań matematycznych, analiza modelu oraz właściwy dobór elementów konstrukcyjnych daje możliwość optymalizacji parametrów procesu, a tym samym zwiększenia wydajności. Do najistotniejszych parametrów należy zaliczyć:

- wielkość (objętość) zbiornika podciśnieniowego,
- wielkość przekrojów instalacji podciśnieniowej,
- ilość i rozmieszczenie odpowietrzeń na płycie modelowej.

Celem podstawowym jest osiągnięcie optymalnego wykorzystania energii powietrza, jako czynnika zagęszczającego.

Na podstawie przeprowadzonej analizy modeli procesu nadciśnieniowego i podciśnieniowego wynikają następujące wnioski:

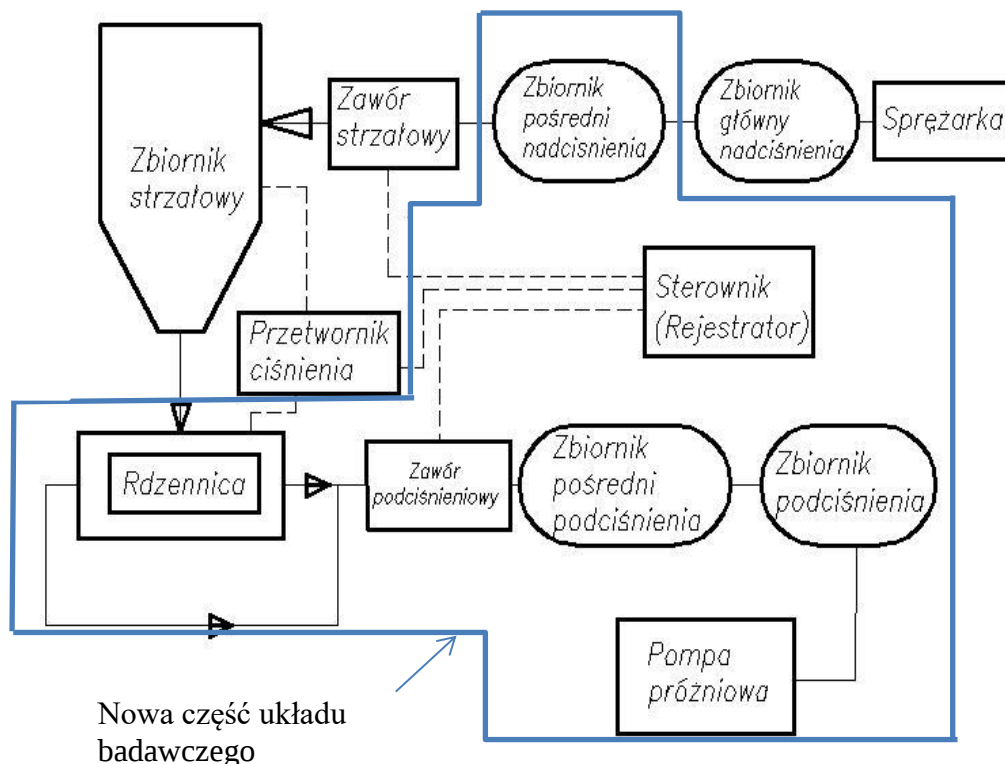
- zasadnicza różnica dotyczy układu połączenia komór pod względem ich kolejności w instalacji,
- w modelu nadciśnieniowym Aksjonova przepływ powietrza następuje poprzez komory i przestrzeń technologiczną, w której zagęszczana jest masa. Odpływ powietrza następuje do otaczającej atmosfery,
- w modelu nadciśnieniowym J.Dańki w instalacji jest zwiększona ilość komór, przez które przepływa powietrze zanim dotrze do przestrzeni technologicznej

oraz samą tę przestrzeń, w której zagęszczana jest masa. Odpływ powietrza następuje do otaczającej atmosfery,

- źródłem energii przepływającego powietrza w obydwu modelach jest zbiornik nadciśnienia sprężonego powietrza,
- w modelu podciśnieniowym przestrzeń technologiczna przepływu jest zamknięta, natomiast odpływ następuje w kierunku komory podciśnieniowej. W modelu podciśnieniowym o charakterze przepływowym strumienia powietrza przestrzeń technologiczna znajduje się w komorze podciśnienia otaczającej rdzennicę lub jej część wyposażoną w system odpowietrzenia. Różnica ciśnienia we wnętrze oraz w komorze podciśnienia wytwarzając określony gradient ciśnienia w warstwach masy jest źródłem energii na przemieszczanie się warstw masy w badanej przestrzeni technologicznej. Zasobem potencjalnej ilości powietrza, które przemieszczając się w układzie zbiornik masy rdzeniowej - wnętrza rdzennicy jest w stanie stworzyć dwufazową mieszaninę masa – powietrze i wykonać pracę przemieszczania w wyniku ekspansji zassanego lub wprowadzonego powietrza w stronę o niższym ciśnieniu, a więc do układu odciągu powietrza zakończonego pompą powietrzną.

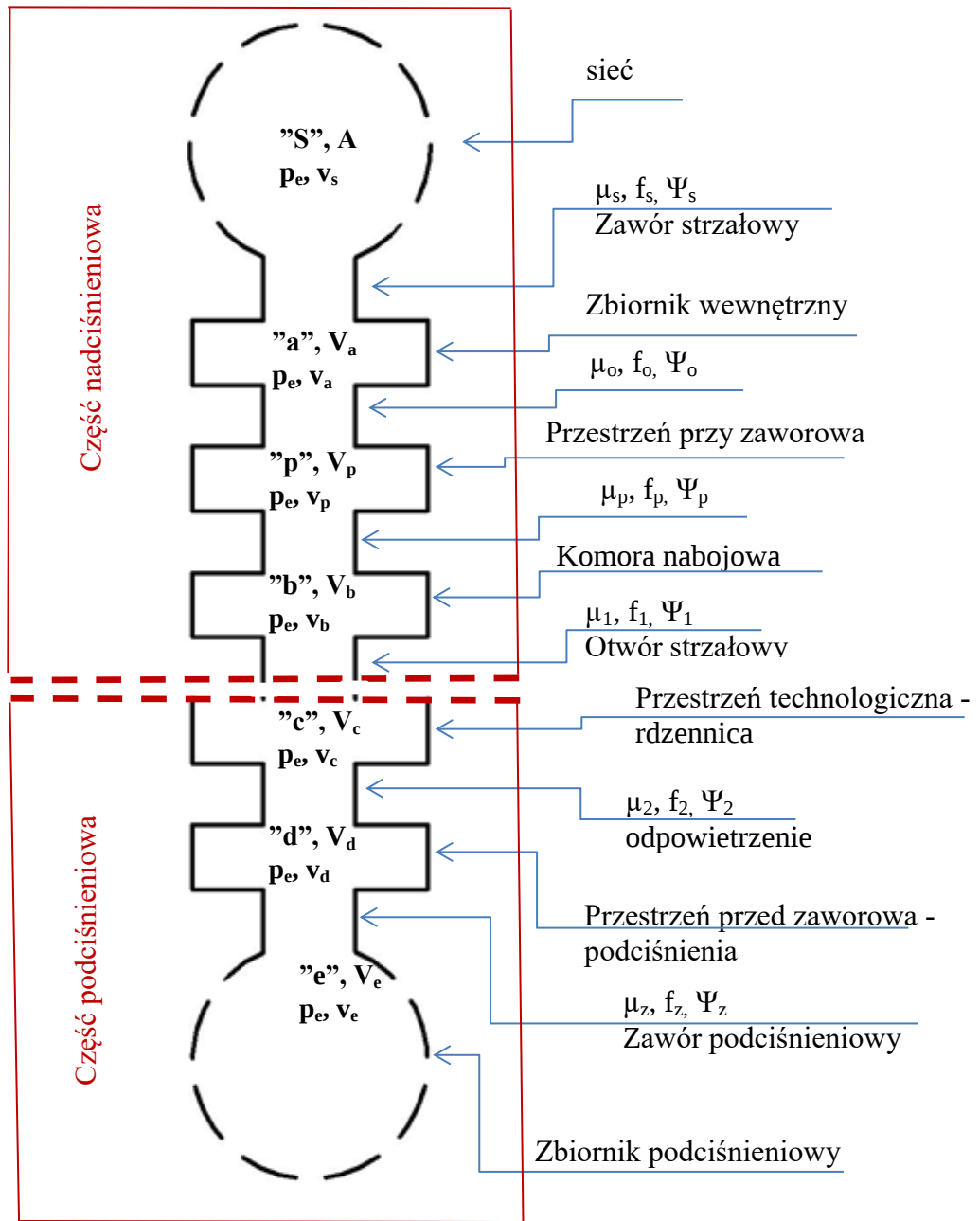
7. Koncepcja rozwiązania zintegrowanego procesu nadciśnienia z podciśnieniem

Założeniem koncepcji modelu działania instalacji w zintegrowanym procesie wykonywania rdzeni jest schemat ideowy stanowiska badawczego (Rys. 9).



Rys. 9. Schemat ideowy oraz główne zespoły funkcjonalne stanowiska badawczego w tym: elementy układu nadciśnienia, elementy układu podciśnienia oraz elementy układu sterowania procesem strzałowym.

Na schemacie (rys. 9) uwzględniono te elementy konstrukcyjne, które wraz z opisem parametrycznym charakteryzują zjawiska zachodzące w zintegrowanym procesie przepływu powietrza i równocześnie ich funkcjonalną zależność. Wzorując się na podstawowych modelach (N.Z. Aksjonow, J. Dańko, M. Ślęzyk) zdefiniowano własny model instalacji do wykonywania rdzeni metodą zintegrowanego procesu nadciśnienia i podciśnienia (rys. 10).



Rys. 10. Rozwinięty model obliczenia strumienia powietrzno piaskowego w rdzennicy z zastosowaniem podciśnienia opracowanie własne. Oznaczenia: s - sieć sprężonego powietrza, a - zbiornik wewnętrzny maszyny, p - przestrzeń przyzaworowa, b - komora nabojowa, c - rdzennica, d - przestrzeń przed zaworowa (podciśnienia), e - zbiornik podciśnieniowy, μ, f, Ψ - wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.

W modelu opisującym przepływ powietrza założono stałą objętość przestrzeni technologicznych (zbiornik wewnętrzny, przestrzeń przy zaworowa, komora nabojoya, przestrzeń technologiczna – rdzennica, przestrzeń przed zaworowa – podciśnienia, zbiornik podciśnieniowy) oraz stałą temperaturę.

W proponowanym modelu instalacji uwzględniono sześć następujących komór:

1. zbiornik wewnętrzny o objętości V_a i ciśnieniu p_a ,
2. przestrzeń przyzaworowa o objętości V_p i ciśnieniu p_p ,
3. przestrzeń komory nabojoyej o objętości V_b i ciśnieniu p_b ,
4. przestrzeń technologiczna (rdzennica) o objętości V_c i ciśnieniu p_c ,
5. przestrzeń przedzaworowa - podciśnienia o objętości V_d i ciśnieniu p_d ,
6. zbiornik podciśnieniowy o objętości V_e i ciśnieniu p_e .

W zintegrowanym modelu na „wejściu” do instalacji, wyróżnia się część opisującą proces nadciśnieniowy, która ma postać opisaną wzorami (12), (13), (14), (15) podanymi w rozdziale 6.2. Kolejna część modelu dotycząca procesu podciśnieniowego jest uwzględniona od połączenia dwóch procesów powietrznych w przestrzeni technologicznej – rdzennicy.

Wzór (27) dotyczy określonej chwilowej zmiany masy powietrza w przestrzeni „a” zwanej zbiornikiem wewnętrznym powietrza zależnej od „s”, czyli źródła sprężonego powietrza.

$$dG_a = \left(\mu_s \cdot f_s \cdot \Psi_s \sqrt{\frac{p_s}{v_s}} - \mu_0 \cdot f_0 \cdot \Psi_0 \sqrt{\frac{p_a}{v_a}} \right) dt \quad (27)$$

Natomiast wzór (28) dotyczy określonej chwilowej zmiany masy powietrza w przestrzeni „p” zwanej przestrzenią przyzaworową, i przestrzeni „a” zależnej od zbiornika wewnętrznego powietrza.

$$dG_p = \left(\mu_0 \cdot f_0 \cdot \Psi_0 \sqrt{\frac{p_a}{v_a}} - \mu_p \cdot f_p \cdot \Psi_p \sqrt{\frac{p_p}{v_p}} \right) dt \quad (28)$$

Wzór (28) określa zmiany masowe powietrza w przestrzeni „b” zwanej komora nabojoyą, zależną od parametrów charakteryzujących przestrzeń „p”,

zwanej przestrzenią przyzaworową.

$$dG_b = \left(\mu_p \cdot f_p \cdot \Psi_p \sqrt{\frac{p_p}{v_p}} - \mu_1 \cdot f_1 \cdot \Psi_1 \sqrt{\frac{p_b}{v_b}} \right) dt \quad (29)$$

Wzór (29) dotyczy określonej chwilowej zmiany masy powietrza w przestrzeni „c”, czyli przestrzeni technologicznej zwanej rdzennicą. Uwzględniona zintegrowana praca układu zakłada równoczesność działania nadciśnienia i podciśnienia. Przyjmuje się, że w przestrzeni „c”, będzie ciśnienie poniżej ciśnienia atmosferycznego. Przestrzeń „b”, dotyczy komory nabojoyej.

$$dG_c = \left(\mu_1 \cdot f_1 \cdot \Psi_1 \sqrt{\frac{p_b}{v_b}} - \mu_2 \cdot f_2 \cdot \Psi_2 \sqrt{\frac{p_c}{v_c}} \right) dt \quad (30)$$

Wzór (31) opisuje stan po stronie podciśnienia, czyli wypływu powietrza z rdzennicy określonej chwilową zmianą masy powietrza w przestrzeni „d” nazwanej „przestrzenią przedzaworową, podciśnienia”, ujmująca czynnik „c” przestrzeń technologiczną - rdzennicę.

$$dG_d = \left(\mu_1 \cdot f_1 \cdot \Psi_1 \sqrt{\frac{p_c}{v_c}} - \mu_2 \cdot f_2 \cdot \Psi_2 \sqrt{\frac{p_d}{v_d}} \right) dt \quad (31)$$

Element zamykający układ modelu podciśnienia został opisany wzorem (32), który określa zmiany masowe powietrza w przestrzeni „e” zwanej zbiornikiem podciśnieniowym, która zależy od przestrzeni „d”, czyli przestrzeni przedzaworowej.

$$dG_e = \left(\mu_2 \cdot f_2 \cdot \Psi_2 \sqrt{\frac{p_d}{v_d}} - \mu_z \cdot f_z \cdot \Psi_z \sqrt{\frac{p_e}{v_e}} \right) dt \quad (32)$$

Wyjaśnienia powyższych wzorów:

f – powierzchnia przekroju analizowanego elementu instalacji pneumatycznej strzelarki: przewodu sieciowego (f_s), zaworu strzałowego (f_0), prześwitu blachy

perforowanej (f_p), otworu wylotowego z głowicy dmuchowej (f_1), otworów odpowietrzających w rdzennicy (f_2), przekroju instalacji podciśnieniowej (f_z),

$\Psi_s, \Psi_o, \Psi_p, \Psi_1, \Psi_2, \Psi_z$ - liczby przepływu na kolejnych stopniach przepływu powietrza,

$\mu_s, \mu_o, \mu_p, \mu_1, \mu_2, \mu_z$ - współczynniki wydatku otworów na kolejnych stopniach przepływu powietrza,

p - ciśnienie absolutne powietrza w przestrzeniach „a”, „p”, „b”, „c”, „d”, „e” maszyny,

v - objętość właściwa w przestrzeniach „a”, „p”, „b”, „c”, „d”, „e”.

Najważniejszy parametr intensywność narastania ciśnienia w komorze technologicznej dla modelu nadciśnienia i podciśnienia opisano wzorem (33).

$$\frac{dp_b}{dt} = \frac{\kappa \cdot p_a^{\frac{1}{\kappa}} \cdot v_p}{V_b} \cdot p_b^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot (\mu_p \cdot f_{pc} \cdot \Psi_p \cdot \sqrt{\frac{p_p}{v_p}} - \frac{\mu_1 \cdot f_1 \cdot \Psi_1}{\sqrt{p_p^{\frac{1}{\kappa}} \cdot v_p}} \cdot \sqrt{p_b^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}) \quad (33)$$

gdzie:

V_p - objętość przestrzeni przyzaworowej "p" ($V_p \approx 0,2 V_b$), m^3 ,

V_b - objętość komory naboowej, m^3 ,

Ψ_p - liczba przepływu dla przegrody perforowanej (stopień $p \rightarrow b$).

Przedstawiony wzór (33) opisuje intensywność narastania ciśnienia w komorze naboowej i jest przystosowany do opisu rozbudowanego układu z podciśnieniem. Dla skończenie małych przedziałów czasowych występuje ciśnienie po stronie odpływu powietrza z przestrzeni technologicznej. Obniżenie ciśnienia w komorze technologicznej spowodowane działaniem podciśnienia niezależnego od ciśnienia atmosferycznego wskazuje, że pomiędzy komorami jest stała i określona zależność ciśnienia podkrytycznego. Od wartości tego ciśnienia zależny jest efekt zagęszczania.

Podejście analityczne do przedstawionych rozwiązań matematycznych, wskazuje na możliwość obliczania złożonego modelu systemu pneumatycznego oraz właściwy dobór elementów konstrukcyjnych, tym samym osiągnięcia celu do opracowania wariantu przed prototypowego. Do najistotniejszych parametrów w konstruowaniu instalacji należy zaliczyć:

- wielkość zbiornika podciśnieniowego,
- wielkość przekrojów instalacji podciśnieniowej,
- ilość i rozmieszczenie odpowietrzeń w rdzennicy.

Podstawowym postępowaniem zakładanym w obliczeniach w procesie wspomagania podciśnieniem jest zastosowanie przemiany adiabatycznej, w której zapotrzebowanie na energię strumienia piaskowo powietrznego będzie odpowiednio mniejsze po stronie nadciśnienia, a efekt uzyskany w zintegrowanym procesie będzie widoczny w przeprowadzonych badaniach, osiągany, jako większe bardziej zwarte upakowanie ziaren masy rdzeniowej w przestrzeni komory rdzennicy.

8. Obliczenia numeryczne ciśnienia i parametrów przepływu powietrza w zespole strzelarki oraz rdzennicy dla wybranych warunków procesowych

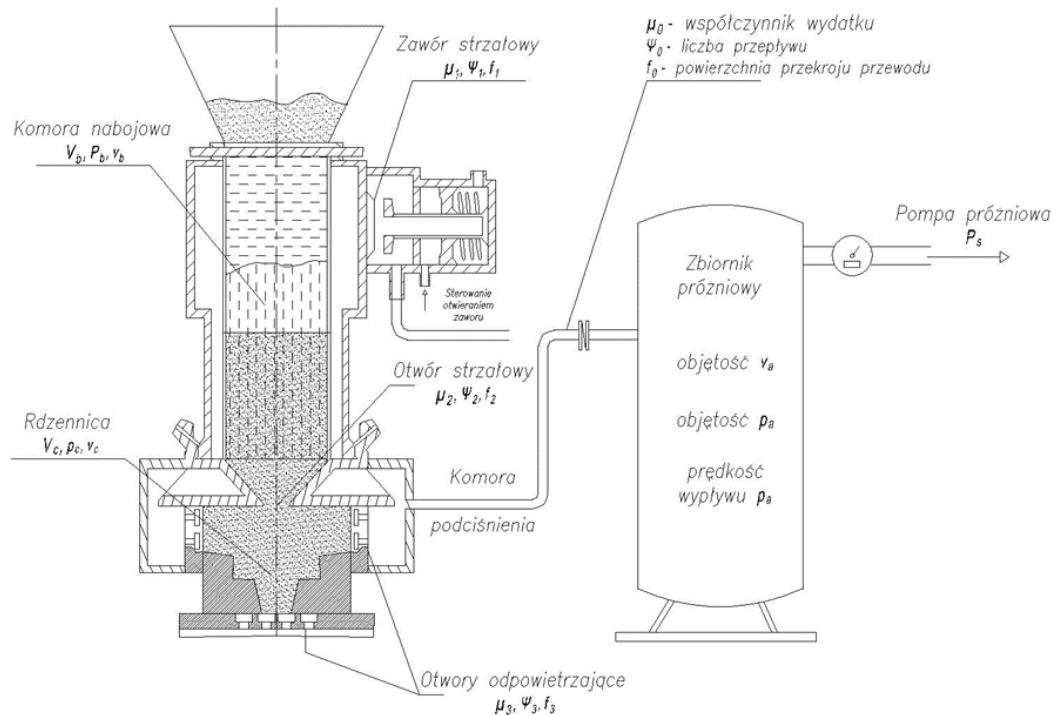
Przedstawione dalej obliczenia numeryczne przebiegu ciśnienia i wybranych parametrów przepływu powietrza w zespole strzelarki i rdzennicy przeprowadzono na przykładzie dla dwóch następujących granicznych stanów układu:

Graniczny stan układu oznaczony, jako Stan I (rys. 12), w którym gradient ciśnienia powietrza w trójsegmentowej rdzennicy jest wywołany przez otwarcie zaworu przy zbiorniku połączonym z pompą próżniową i wyciąganie powietrza przez otwory odpowietrzające usytuowane w górnych częściach obydwu bocznych sektorów rdzennicy. Sektor środkowy rdzennicy o pojemności zbliżonej do 1/3 jej pojemności całkowitej ma w tym przypadku nieaktywne odpowietrzenia górne i jest symetrycznie połączony z obu sąsiednimi sektorami bocznymi za pomocą prawego bądź lewego kanału uzyskanego przez wycięcie w bocznych wkładkach prostokątnych otworów każdy o powierzchni $2,5\text{cm}^2$.



Rys. 11. Wersja trójsektorowej rdzennicy doświadczalnej stosowanej w przykładowych obliczeniach numerycznych przebiegu ciśnienia. Rdzennica ta odpowiada wersji rdzennicy oznaczonej R-4, z wkładkami „G” $2,5\text{ cm}^2$ [50].

W początkowym stanie procesowym komora nabojowa napełniona masą rdzeniową jest otwarta do otoczenia poprzez otwarty (lub odłączony) zawór strzałowy i służy, jako zbiornik masy połączony przez otwór strzałowy i sektor środkowy z bocznymi wnękami rdzennicy (rys. 11).



Rys. 12. Poglądowe zestawienie funkcjonalnych zespołów stanowiska doświadczalnego do podciśnieniowego wspomagania procesu zapelniania i wstępnego zagęszczenia masy w 3 sektorowej rdzennicy strzelarki.

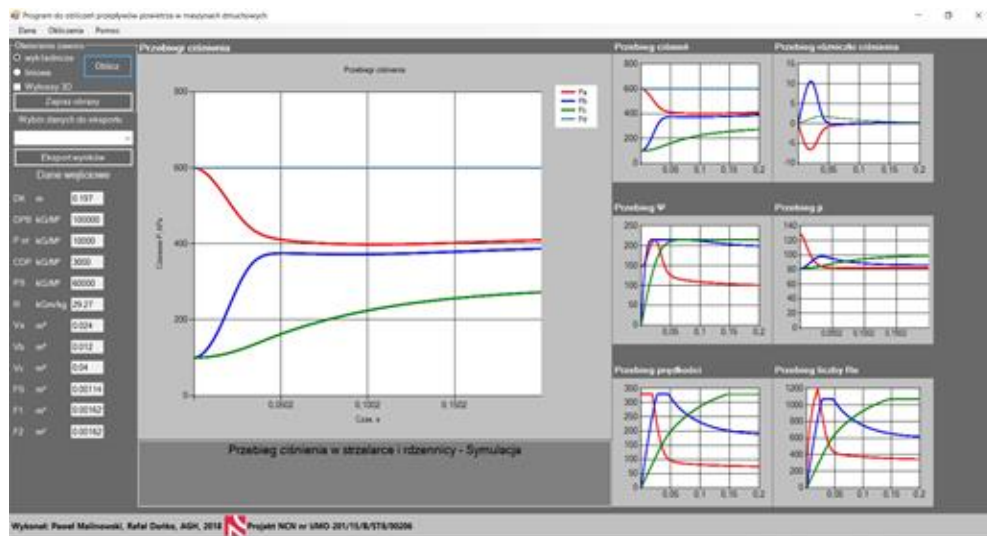
W rozważanym stanie I (rys. 12) ciśnienie powietrza w rdzennicy i w komorze nabojojowej jest równe wartości ciśnienia otoczenia przyjętego umownie $p_{ot} = 1000 \text{ hPa}$. Ciśnienie to jednocześnie jest górnym ciśnieniem powodującym przepływ zarówno powietrza, jak również czynnikiem wywołującym zasysanie części masy rdzeniowej z komory nabojojowej do sektora środkowego, a dalej jej przenoszenia w strumieniu powietrza symetrycznie przez wycięcia w obu wkładkach do sektorów bocznych i kolejno w kierunku otwartych otworów odpowietrzających w górnej części (ewentualnie z boków) rdzennicy. **Warunkiem takiego przebiegu ruchu powietrza i masy jest szczelne połączenie otworów odpowietrzających z komorą podciśnienia otaczającą całość lub wydzieloną część rdzennicy, w której uzyskiwane zagęszczenie masy bez wspomaganie podciśnieniowego jest mniejsze od wartości wymaganej determinującej jakość danego odlewu.**

W tym przypadku gradient ciśnienia powietrza w trójsegmentowej rdzennicy jest wywołany przez otwarcie zaworu przy zbiorniku połączonym z pompą próżniową. Wyciąganie (zasysanie) powietrza przez otwory odpowietrzające usytuowane w górnych częściach obydwu bocznych sektorów rdzennicy jakkolwiek jest korzystne, jednak mniej skuteczne na skutek zwiększonych oporów przepływu dwufazowego strumienia przez zajętą częściowo wnękę. Energia strumienia w tzw. obszarze „przepływu nadciśnieniowego” przejawia się przede wszystkim zwiększoną wartością gęstości pozornej masy w osi otworu strzałowego. W sytuacji zapełniania wnęk o prostych kształtach, niewymagających kilku zmian kierunku płynięcia masy, korzystny efekt stosowania podciśnienia wpływa na zwiększone zagęszczenie masy i możliwość wstrzelenia dodatkowej porcji masy.

W rozważanym stanie oznaczonym II ciśnienie powietrza w rdzennicy i w komorze nabojoyej jest wynikiem określonego bilansu przepływu powietrza, uwidocznione na zapisie graficznym sporządzonym metodą obliczeń numerycznych, omówionych w dalszej części rozprawy. Podobnie jak w wersji I, również w tym przypadku warunkiem skutecznej „współpracy” przebiegu ruchu powietrza z części nadciśnieniowej poprzez masę i otwory odpowietrzające do systemu jego odciągu jest szczelne połączenie otworów odpowietrzających z komorą podciśnienia, tworzącą przestrzeń analogiczną do kolektora otaczającego całość lub wydzieloną część rdzennicy.

Przykładowe obliczenia przepływu powietrza w układzie strzelarki, przeprowadzono z zastosowaniem programu NOVA LICZ, który jest programem autorskim zrealizowanym na Wydziale Odlewnictwa AGH w ramach projektu badawczego NCN przez P. Malinowskiego i R. Dańko [50].

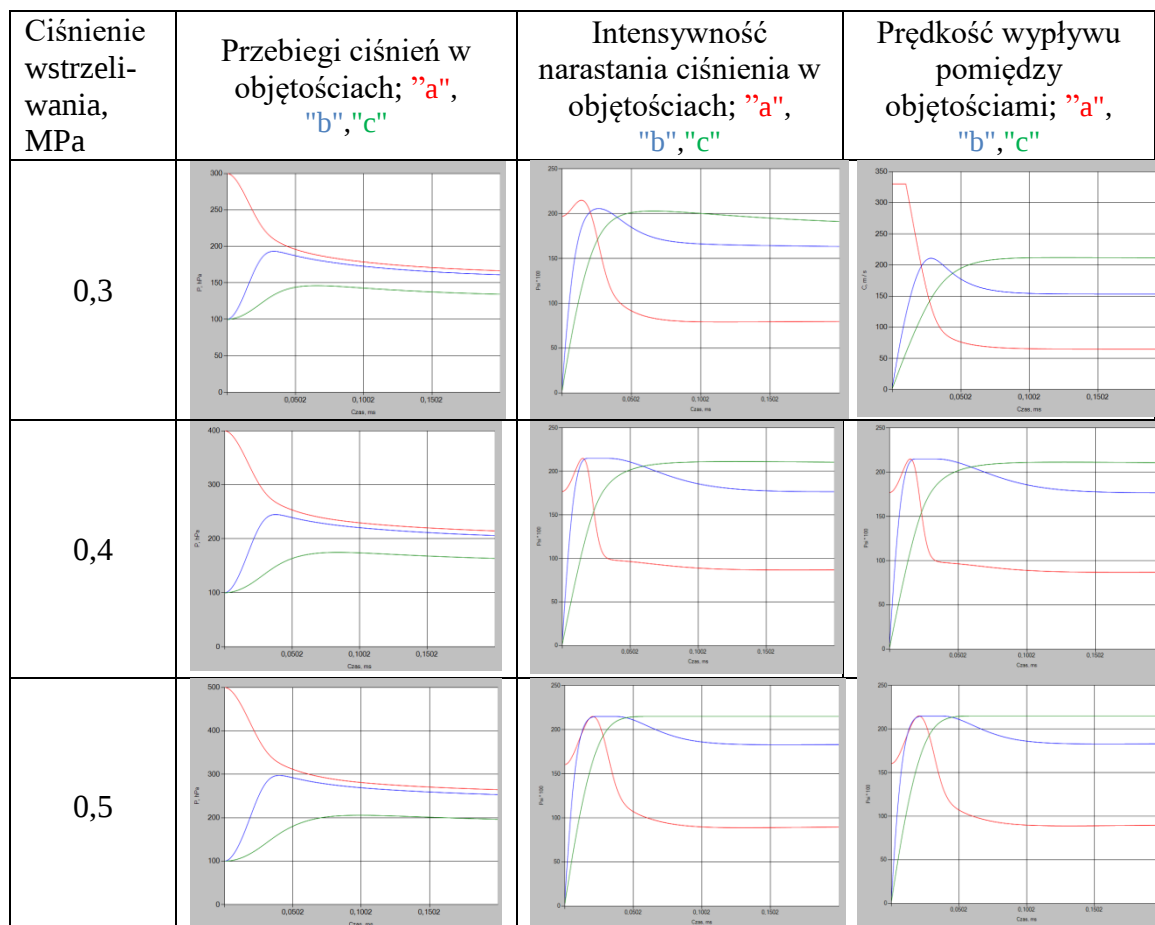
Istotę programu obliczeniowego przedstawiono na rysunku 14, który przedstawia przykładowy zrzut ekranu. Podstawą działania programu do opracowania wyników symulacyjnych parametrów procesów dmuchowych jest rozszerzony model Aksjonova [2, 50]. Program daje możliwość wygenerowania oraz zapisu wartości z obliczeń do formatu programu Excel. Program umożliwia łatwą graficzną prezentację przebiegu ciśnienia p_a , p_b , p_c w funkcji czasu, jak również możliwość określenia ciśnienia granicznego p_b^{gran} dla zadanych parametrów procesowych przy stałym $p_a = p_s$, panującego w zbiorniku wyrównawczym w chwili czasu $\tau = 0$.



Rys. 14. Zrzut ekranu programu obliczeniowego Nova Licz do symulacji przepływu powietrza w maszynach dmuchowych [87].

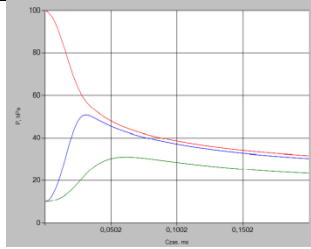
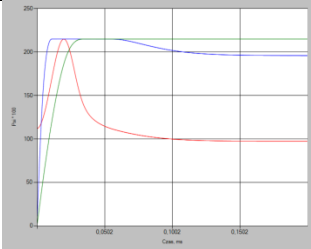
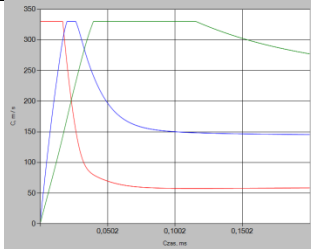
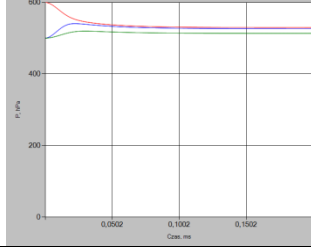
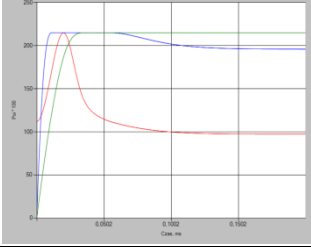
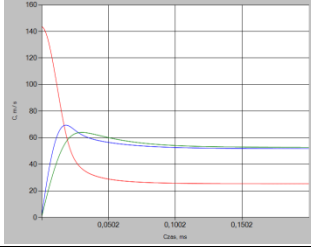
Zestawienie wybranych reprezentatywnych wyników, ze zbioru przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych w warunkach nadciśnienia ($p_s = 0,3; 0,4; 0,5\text{MPa}$) obejmują: ciśnienie graniczne w funkcji ciśnienia wstrzeliwania, intensywność narastania ciśnienia powietrza i prędkości wypływu w objętościach "a", "b" i "c" w wirtualnej strzelarce, przedstawiono w tabeli 2 ($V_a/V_b = 8,0$). Oznaczenia literowe dotyczą: „a” – objętość zbiornika powietrza, „b”- objętość komory naboju, „c” - objętość rdzennicy. W programie symulacji z nadciśnieniem uwzględniono charakterystykę wykładniczą otwierania zaworu.

Tabela 2. Graficzne zestawienie porównawcze obliczeń symulacyjnych dla ciśnienia strzału (nadciśnienia) 0,3; 0,4; 0,5, przebiegu ciśnień, intensywności narastania ciśnienia w obliczanych komorach oraz prędkość pomiędzy komorami "a", "b", "c", $V_a/V_b = 8$, zawór otwierany wykładniczo.

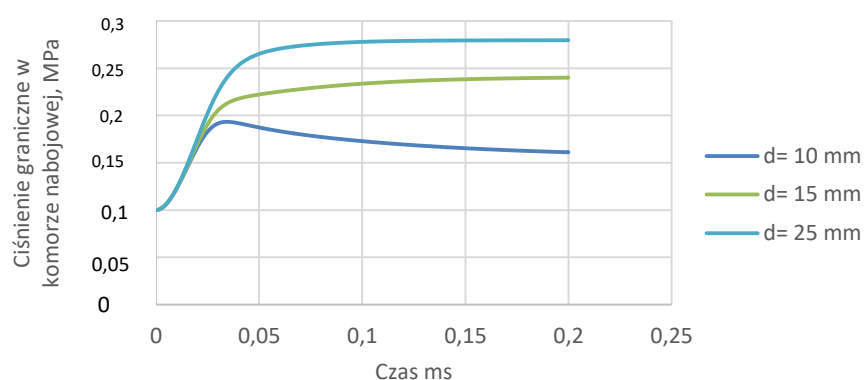


Natomiast wybrane wyniki z obliczeń symulacyjnych w warunkach podciśnienia ($p_s = 0,0; 0,05\text{MPa}$) obejmują: ciśnienie graniczne, intensywność spadku ciśnienia powietrza i prędkości wypływu w objętościach "c", "d" i "e" w wirtualnej strzelarce, przedstawiono w tabeli 3 ($V_a/V_b = 8,0$). Oznaczenia dotyczą: „b”- objętość komory naboowej, „c” - objętość rdzennicy, „e” – objętość zbiornika próżniowego. W programie symulacji z podciśnieniem uwzględniono charakterystykę wykładniczą otwierania zaworu.

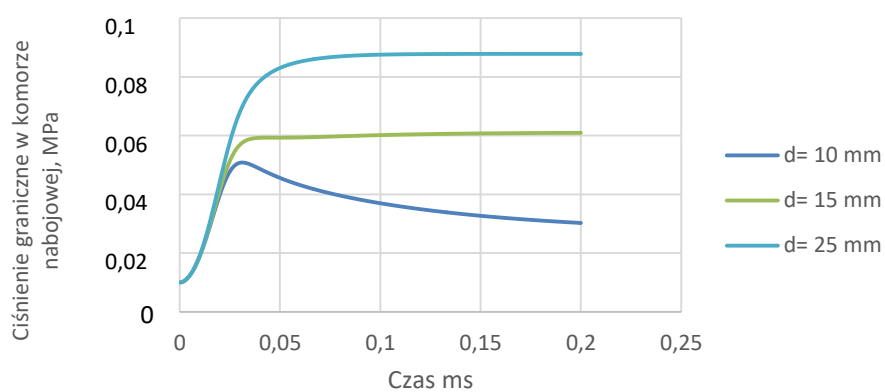
Tabela 3. Graficzne zestawienie porównawcze obliczeń symulacyjnych dla ciśnienia - podciśnienia 0,0; 0,05, przebiegu ciśnień, intensywności narastania ciśnienia w obliczanych komorach oraz prędkość pomiędzy komorami "b", "c", "e", $V_a/V_b = 8$, zawór otwierany wykładniczo.

Ciśnienie wysysania p_s , MPa	Przebiegi ciśnień w objętościach; "b", "c", "e"	Intensywność narastania ciśnienia w objętościach; "b", "c", "e"	Prędkość wypływu pomiędzy objętościami; "b", "c", "e"
0,0			
0,05			

Wyniki uzyskane z programu symulacyjnego uwzględniają możliwość sporządzeniu charakterystyk zależności ciśnienia granicznego od średnicy otworu strzałowego. Przykładowe charakterystyki (dane wprowadzone do programu Excel) dla trzech średnic 10, 15, 25mm przedstawiono na rysunkach 15 i 16. Na przedstawionych rysunkach (również niezależnych charakterystykach) stwierdzono pewną prawidłowość zmiany ciśnienia granicznego, intensywności narastania ciśnienia, prędkości wypływu w komorze nabojoyej i rdzennicy w funkcji otworu strzałowego. Naturalną prawidłowością zwiększania nastawy ciśnienia roboczego strzału jest analogiczna zmiana zarejestrowana w komorze nabojoyej i rdzennicy. Zakładając stałą wartość ciśnienia roboczego przy określonym stopniu odpowietrzenia, zmiana uzyskiwanych parametrów w obliczonych objętościach "a", "b" i "c" zależna jest od powierzchni przekrojów łączących dane przestrzenie w układzie sparametryzowanej geometrycznie i fizycznie wirtualnej strzelarki.



Rys. 15. Wyniki obliczeń ciśnienia granicznego w zależności od średnicy otworu strzałowego dla ciśnienia strzału 0,3MPa.



Rys. 16. Wyniki obliczeń ciśnienia granicznego w zależności od średnicy otworu strzałowego dla podciśnienia 0,0MPa.

9. Cel i tezy badawcze pracy

9.1. Cel pracy

Cele pracy można następująco sformułować w kolejności umownego ich znaczenia nakreślające główne zamierzenia badawcze:

1. Zintegrowanie dwóch zakresów procesu dmuchowego, czyli zwyczajowo stosowanego nadciśnienia występującego w układzie maszyny dmuchowej oraz podciśnienia wywołanego kontrolowanym strefowym odciąganiem powietrza z przestrzeni technologicznej w celu poprawy, jakości wykonywania rdzeni o rozbudowanej geometrii kształtu.
2. Uzyskanie możliwości wpływu na właściwości quasi-hydrauliczne strumienia piaskowo-powietrznego i przebiegu procesu technologicznego za pomocą dołączenia do konstrukcji rdzennicy dodatkowego układu z instalacją podciśnienia w miejscach rozłożenia otworów odpowietrzających a tym samym poszerzenie zakresu potencjalnego oddziaływania ciśnienia zarówno na zapełnianie, jak również na zagęszczenie masy z wykorzystaniem odpowiednio ukształtowanego gradientu ciśnienia we wnękach rdzennicy.
3. Poprawę jakości rdzeni wynikającą z możliwości zapełnienia pustek w trudnodostępnych sektorach rdzennicy i kontrolowanego zagęszczania oraz likwidację stref o niedostatecznej wytrzymałości.
4. Zwiększenie stopnia efektywnego wykorzystania gazowych czynników utwardzających w technologii mas chemoutwardzalnych.

Celami uzupełniającymi są:

- poprawa technologii i jakości wykonywania rdzeni o rozbudowanej geometrii kształtu,
- zwiększenie możliwości kontroli przepływu czynników gazowych (parowania, wpływów) i produktów reakcji w porównaniu do układów nadciśnieniowych, w celu obróbki neutralizacyjnej zgodnie z BHP.

Wyznaczone cele wskazują na konieczność zaprojektowania i zbudowania stanowiska badawczego z innowacyjnym zintegrowanym układem składającym się z istniejącej instalacji nadciśnienia i nowej zaprojektowanej instalacji podciśnienia. Procesowo, do instalacji podciśnienia podłączona będzie rdzennica (układ odsysania

powietrza). W takim układzie stworzone zostaną warunki do porównania efektów kinetyczno – dynamicznych procesu dmuchowego z klasycznym rozwiązaniem strzelarki. Równoczesne rejestrowanie ciśnienia w komorze strzałowej i rdzennicy oraz wykreślenie krzywej rozkładu mierzonych wartości ciśnienia w czasie, stwarza warunki oceny skuteczności realizowanego procesu i zaadaptowania rozwiązania klasycznej strzelarki do układu technicznego z zintegrowanym systemem podciśnienia. Do badań włączone zostanie istniejące stanowisko badawcze dostępne w laboratorium Wydziału Odlewnictwa AGH.

9.2. Tezy pracy

Treścią tez jest zdefiniowanie grupy zjawisk zachodzących w zintegrowanej instalacji, których udowodnienie jest istotnym zadaniem podjętej rozprawy.

- I. System wstrzeliwania masy rdzeniowej w procesie dmuchowym polegającym na integracji efektów procesu dmuchowego w cyklu pracy urządzenia w zakresie powyżej ciśnienia atmosferycznego (nadciśnienia) z efektami procesowymi uzyskanymi przy ciśnieniu mniejszym od ciśnienia otoczenia (podciśnienia), umożliwia zmianę quasi-hydraulicznych właściwości strumienia piaskowo-powietrznego i wpływa korzystnie na zwiększenie stopnia zagęszczenia w całej objętości rdzenia.
- II. W procesie dmuchowym kierunek i prędkość przemieszczania się strumienia piaskowo-powietrznego masy rdzeniowej wewnątrz rdzennicy są regulowane przez powstający gradient ciśnienia powietrza wywołany przede wszystkim przez rozmieszczenie i powierzchnię czynną odpowietrzników, a kontrolowane strefowe obniżenie ciśnienia w rdzennicy przyczynia się do stabilnego przebiegu procesu dmuchowego w miarę zapełniania rdzennicy i ograniczenia negatywnego efektu zatykania odpowietrzników przez narastające warstwy zagęszczanej masy, co występuje w tradycyjnych rozwiązaniach.

10. Metodyka badań

10.1. Charakterystyka istniejącego stanowiska badawczego

Do serii badań związanych z technologią wstrzeliwania rdzeni w układzie klasycznego, nadciśnieniowego procesu wytypowano stanowisko laboratoryjne znajdujące się w Katedrze Inżynierii Procesów Odlewniczych AGH. Wyniki badań uzyskane w szerokim zakresie ciśnienia wstrzeliwania i średnic otworu strzałowego były traktowane, jako technologia referencyjna dla innego sposobu realizacji procesu wstrzeliwania również tej samej masy traktowanej, jako masa referencyjna. Stanowisko „referencyjne” zbudowane jest na bazie strzelarki SR-3D (nazwa własna), w skład, której wchodzi: instalacja sprężonego powietrza, zawór strzałowy typu ‘hansberg’, komora nabojoya, rdzennica doświadczalna, przetworniki (czujniki) ciśnienia oraz rejestrator. Na rysunku 18 przedstawiono widok tej części stanowiska, które posłużyło do realizacji badań procesu dmuchowego w układzie konwencjonalnym zespołu wstrzeliwania.

Strzelarka podłączona jest do źródła (sieci) sprężonego powietrza instalacją rurową DN40 z zastosowaniem zbiornika powietrza $V_a = 100 \text{ dm}^3$, pełniącego rolę zbiornika wyrównawczego.

Strzelarka doświadczalna SR-3D (nazwa własna) ma pojemność konstrukcyjną $3,3 \text{ dm}^3$ perforowanej wkładki komory nabojoyej. Całkowita powierzchnia perforacji tulei strzałowej wynosi $10,2 \text{ cm}^2$, co stanowi 4,2% jej całkowitej powierzchni bocznej. Jest to wartość mieszcząca się w przedziale udziału aktywnej powierzchni przegród i dostosowanych w technice fluidyzacyjnej sypkich materiałów ziarnistych ($\beta=3\text{-}5\%$ - suszarki, chłodziarki, rynnny transportowe [121,122]). Strzelarka jest wyposażona w zawór strzałowy typu "hansberg", umożliwiający wykonanie rdzeni o masie do 1 kg, w zakresie ciśnień $0,4\text{MPa} \div 0,6\text{MPa}$, przy dużej intensywności narastania ciśnienia w komorze nabojoyej wynoszącej $7,2 - 8,4 \text{ MPa/s}$.

W badaniach na dotychczasowym stanowisku badawczym, jako podstawowe wyposażenie stosowano poziomą rdzennicę oznaczoną, w pracach [50, 51] jako wersja R-1 (rys. 17) o prostopadłościennej wnęce o wymiarach $200 \times 86 \times 47\text{mm}$, której pojemność wnęki technologicznej wynosiła $0,808 \text{ dm}^3$.



Rys. 17. Jednownikowa rdzennica doświadczalna R-1, stosowana w cytowanych badaniach ruchu strumienia piaskowo-powietrznego w procesie wstrzeliwania masy rdzeniowej [50].

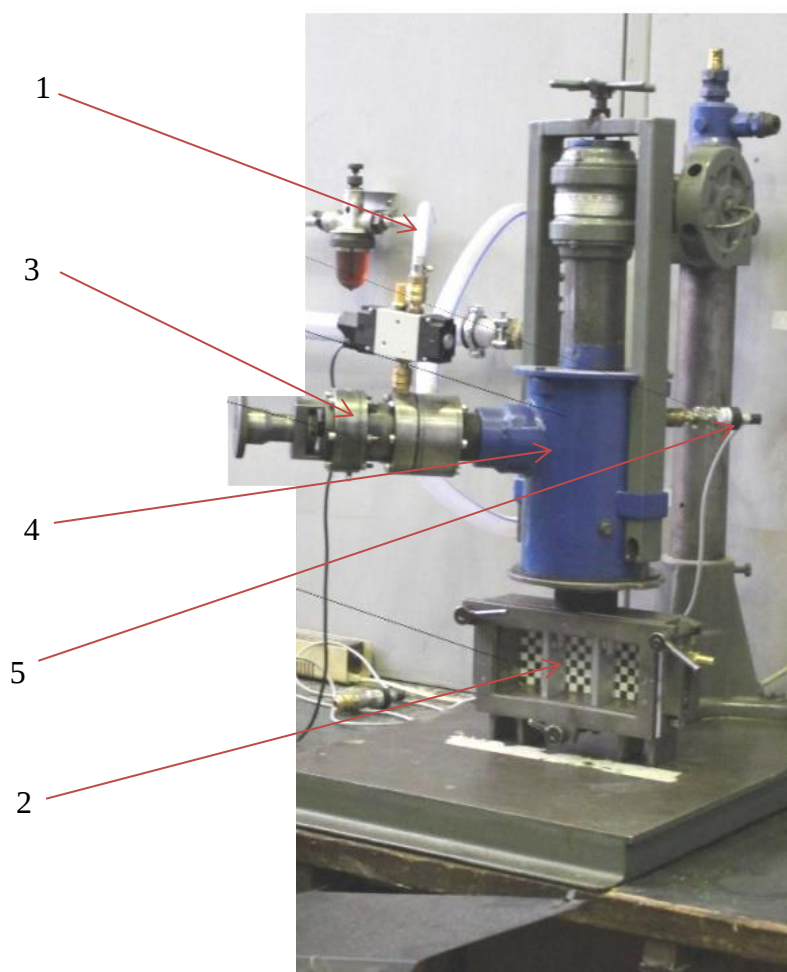
Wewnętrzna komora ma na tylnej ścianie mozaikę kwadratów o boku 1 cm i jest zamknięta pokrywą z oknem wizyjnym do bezpośredniej obserwacji wypełniania wnęki technologicznej i rejestracji tego procesu tzw. szybkobieżną kamerą cyfrową, której wcześniejsze rozwiązanie stanowiła kamera fotograficzna PETAZET 16, mająca także duże możliwości rejestracji procesu z szybkością 3000 zdjęć/s.

Nowo wykonana rdzennica ma taką samą pojemność ($0,817 \text{ dm}^3$) oraz wymiary wnęki roboczej, a także analogiczne rozmieszczenie odpowietrzeń, jak rdzennica referencyjna stosowana w badaniach [50, 51]. Nowa rdzennica dodatkowo wyposażona w oryginalny system kontroli stopnia odpowietrzenia za pomocą króćców z zaworkami odcinającymi, dołączonymi do podciśnieniowego odsysania powietrza z wnęki rdzennicy, który umownie nazwano "Podciśnieniowe Wspomaganie Wstrzeliwania" (ang. (V)accum (A)ssisted (S)hooting).

W badaniach własnych, dotyczących wpływu parametrów procesowych na zapełnianie rdzennicy referencyjnej i na gęstość masy zagęszczanej metodami dmuchowymi korzystano z metodyki opracowanej w ramach wcześniejszych badań [50, 51].

Zastosowane korki odpowietrzające charakteryzowały się średnicą montażową 12 mm oraz powierzchnią czynną 15,6 %, określoną z wykorzystaniem mikroskopu optycznego, co wynosi $0,176 \text{ cm}^2$ czynnej powierzchni prześwitu. W przedstawianych badaniach odpowietrzenie rdzennicy realizowano za pomocą sektorowo rozmieszczonych 26 typowych korków odpowietrzających. Stosowano generalnie 3 opcje systemu odpowietrzeń.

Do badań wytypowano masę rdzeniową ze spoiwem cordis (skład masy: piasek kwarcowy 1k 0,20/0,16/0,32 – 100 cz. mas, spoiwo cordis – 2.2 cz. mas, anorgit 8322 – 1.2. cz. mas), która w wyniku przeprowadzonych prób wykazała największą stabilizację właściwości technologicznych w próbach wypełniania rdzennicy oraz zagęszczania. Skład masy stosowanej w prezentowanych badaniach zamieszczony w przypisie był taki sam jak w przypadku wcześniej opisanych prób zamieszczonych w monografii R.Dańko, tabela V.1 str.158 [50].

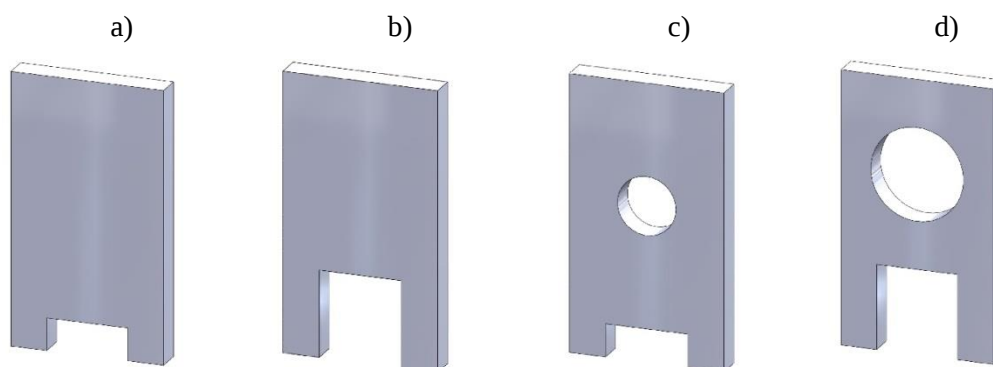


Rys. 18. Widok stanowiska doświadczalnego przed modernizacją: 1 - instalacja sprężonego powietrza, 2 - trójsektorowa rdzennica doświadczalna, 3 - zawór typu Hansberg, 4 - komora nabojowa, 5 - przetwornik (czujnik) ciśnienia.

W szeregu badań wcześniejszych w konstrukcji rdzennicy dokonano zmiany geometrii wnętrza za pomocą wkładek (przegrody), dokonano podziału na 3 sektory o określonych objętościach. W wkładkach wycięte są otwory, kanały (przelotowe)

o zróżnicowanych przekrojach, poprzez które następuje symetrycznie rozptyw strumienia piaskowo-powietrznego od dojścia do spodu rdzennicy, do obu sektorów bocznych.

Widok stosowanych przegród o różnych kształtach geometrycznych do celów badawczych przedstawiono na rysunku 19.



Rys. 19. Przegrody o różnych kształtach geometrycznych stosowane we wnęce rdzennicy doświadczalnej; a) wkładka z wycięciem dolnym o powierzchni $2,5 \text{ cm}^2$, b) wkładka z wycięciem dolnym o powierzchni $6,4 \text{ cm}^2$, c) wkładka z wycięciem dolnym o powierzchni $2,5 \text{ cm}^2$ i otworem centralnym o powierzchni $2,48 \text{ cm}^2$, d) wkładka z wycięciem dolnym o powierzchni $6,4 \text{ cm}^2$ i otworem centralnym o powierzchni $6,47 \text{ cm}^2$ [50- Monografia R.Dańko].

Przeprowadzone badania były podstawą do analizy wypełnienia przestrzeni technologicznej rdzennicy, określenia gęstości pozornej dla zadanych warunków początkowych i oceny rozkładu zagęszczenia w przestrzeni technologicznej.

10.2. Koncepcja projektowa stanowiska badawczego

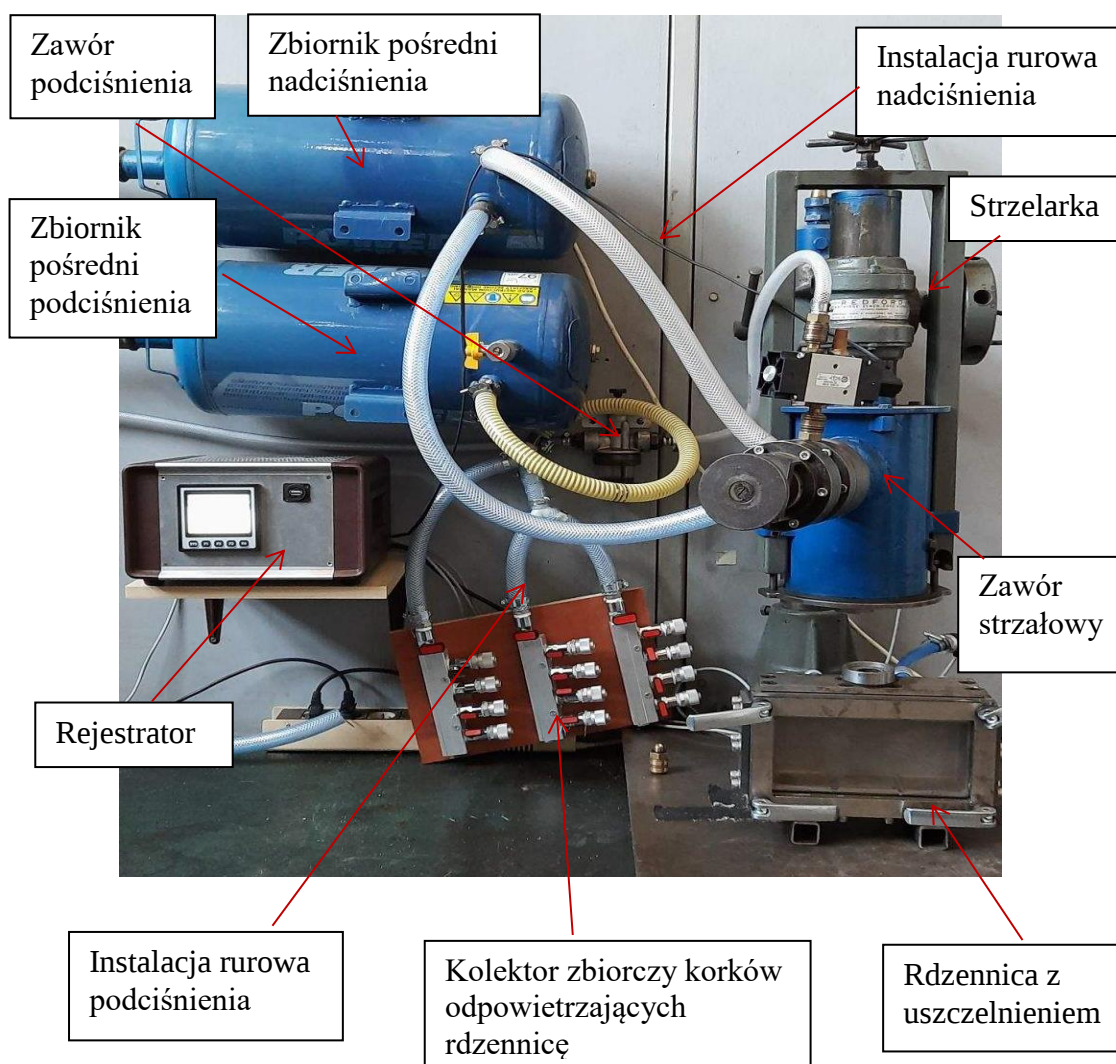
W opracowaniu programu modernizacji stanowiska, według schematu przedstawionego na rysunku 9 uwzględniono następujące założenia:

- podłączenie stanowiska do dwóch instalacji nadciśnienia i podciśnienia z możliwością niezależnego włączania procesu z nadciśnieniem i podciśnieniem oraz jednoczesnego obydwu procesów. Należy rozróżnić podłączenie strzelarki i rdzennicy,
- zaprojektowanie i wykonanie instalacji pneumatycznej,
- zaprojektowanie i wykonanie nowej rdzennicy stosownie do założonego programu badań. W nowej rdzennicy zachowane zostały; kształt i wymiary

wnęki technologicznej oraz umiejscowienie i przekrój otworu strzałowego, geometria otworów odpowietrzających,

d) zaprojektowanie i wykonanie instalacji sterującej i pomiarowo – rejestrującej.

Na rysunku 20 przedstawiono widok zespołów stanowiska badawczego zrealizowanego do potrzeb niniejszej rozprawy (dane techniczne zespołów zostały podane w dalszej części rozprawy)



Rys. 20. Stanowisko badawcze do zintegrowanego procesu wykonywania rdzeni metoda strzałowa z zastosowaniem wspomaganie podciśnienia.

Modernizacja stanowiska umożliwiła realizację badań wstępnych i zasadniczych zgodnie z przyjętym planem postępowania.

Celem badań wstępnych objęto sprawdzenie poprawności zaprojektowania i wykonania stanowiska badawczego. W strukturze stanowiska, oprócz zasadniczych elementów typu zbiornik, rdzennica, została wykonana instalacja pneumatyczna nadciśnienia i podciśnienia. Sieć takiej instalacji tworzy system, w którym występują odgałęzienia służące do połączenia elementów rurowych. Połączenia wymagają przeprowadzenia próby szczelności w celu wykrycia tak zwanych wycieków. Z przeglądu dostępnych metod wykrywania nieszczelności, wybrano rozwiązanie pomiaru metodą ultradźwięków. Jest to metoda skuteczna i umożliwiająca wykrycie nieszczelności nie tylko na długości całej instalacji, a także w każdym miejscu połączenia. Ze względów technologicznych zachowanie szczelności na połączeniach, jest ważne gdyż w tych miejscach występują zjawiska mające wpływ na zmianę przepływu samego powietrza, ale również bilansu przepływu strumienia powietrzno-piaskowego. W konsekwencji przekłada się to poprawność pracy instalacji pneumatycznej decydującej o skuteczności procesu wykonania rdzeni.

Celem badań zasadniczych były pomiary, których analiza jest integralnym elementem służącym do udowodnienia postawionych tez.

Stanowisko składa się z dwóch części nadciśnieniowej i podciśnieniowej. Nowością w stanowisku jest rozbudowanie o część podciśnieniową, zawierającą:

- instalację rurową pomiędzy rdzennicą, zbiornikiem podciśnieniowym i pompą próżniową,
- zawór podciśnieniowy,
- zbiornik podciśnieniowy,
- pompę próżniową.

Ostateczną strukturę zmodernizowanego stanowiska tworzą:

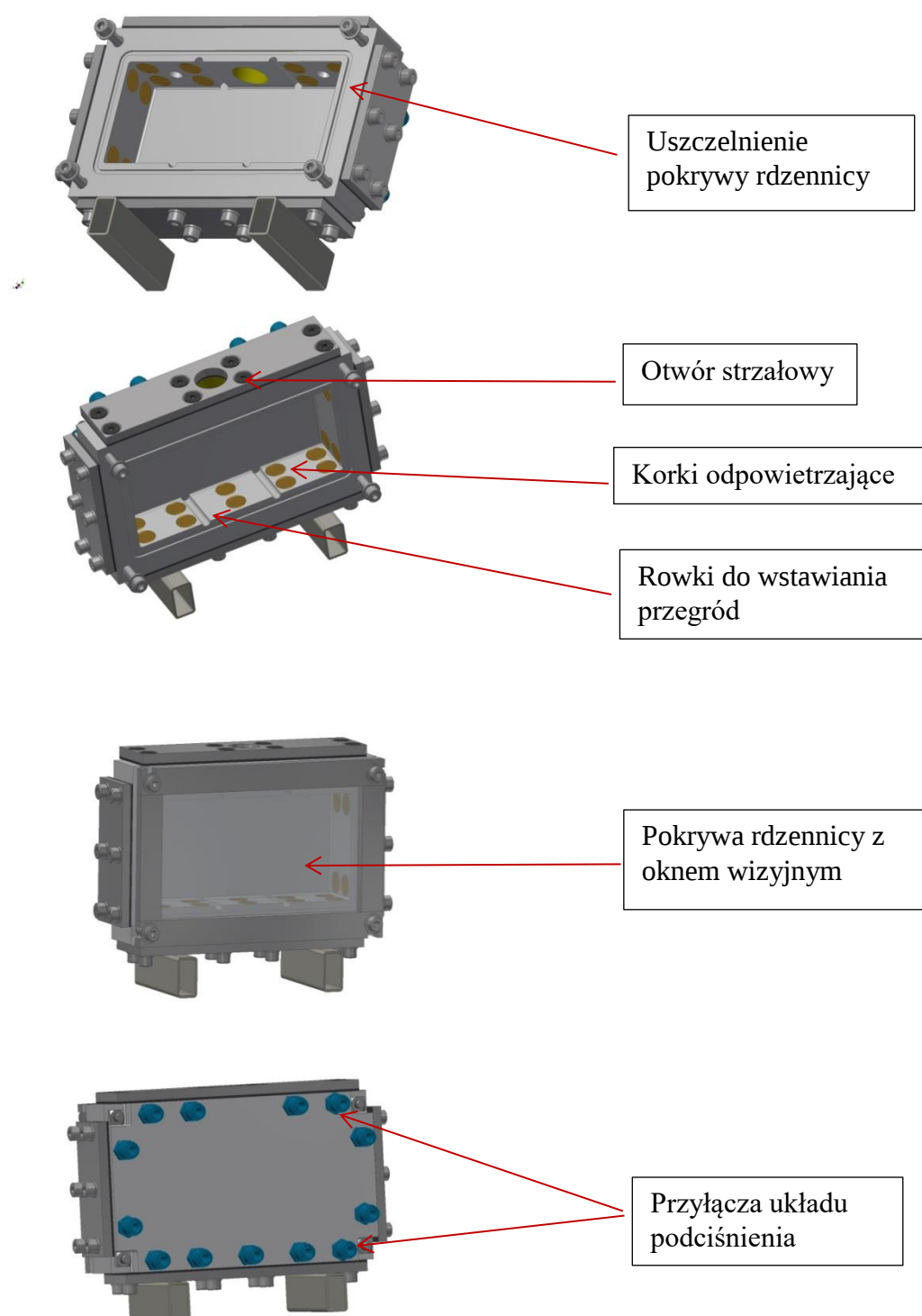
- zbiornik wyrównawczy nadciśnienia; do istniejącego stanowiska dołączono dodatkowy zbiornik, jako bufor celem zapewnienia odpowiedniego ciśnienia i ilości powietrza gwarantującego stabilizację procesu,
- zawór strzałowy; pozostał bez zmian, gdyż gwarantuje odpowiednią dynamikę procesu,
- komora strzałowa; pozostała bez zmian, o istniejącej objętości i perforowanego wyłożenia,

- połączenie komory strzałowej z rdzennicą; zmiana uszczelnienia na powierzchni przylegania z dodatkowym łącznikiem,
- rdzennica: według założeń do możliwych wariantów przepływu strumienia piaskowego i skuteczności wypełniania przestrzeni technologicznej, system uszczelnienia zgodnie z wymogami procesowymi,
- instalacja w miejscach odpowietrzeń z możliwością podłączenia układu podciśnieniowego,
- instalacja podciśnienia; składająca się z kolektora zbiorczego kanałów odpowietrzających, zaworu odcinającego, dwóch zbiorników podciśnienia, pompa próżniowa, połączenia rurowe,
- instalacja pomiarowa i rejestrująca, w tym nowy program do monitorowania i zapisu nadciśnienia oraz podciśnienia. Do pomiaru ciśnienia zastosowano cyfrowe czujniki, natomiast do zobrazowania i stworzenia warunków analizowania strumienia powietrzno-masowego, zastosowano rejestrację kamerą cyfrową.

10.3. Konstrukcja rdzennicy do badań

Projekt nowej rdzennicy do badań w zintegrowanym procesie wykonywania rdzeni stworzono na bazie danych z badań opublikowanych wcześniej [26, 40, 45, 50, 51, 57]. W zbiorze danych są parametry dotyczące wnęki komory roboczej (200 x 85 x 48 mm), ilości otworów odpowietrzających wraz z ich rozmieszczeniem.

Poglądową konstrukcję rdzennicy przedstawiono na rysunku 21 z zaznaczeniem: uszczelnienia pokrywy, usytuowania otworu strzałowego, rozłożenia korków odpowietrzających, pokrywy z oknem wizyjnym oraz miejsc, do których będą podłączone elementy układu podciśnienia. Na jednej ze ścian zaznaczone są rowki służące do ustawiania przegród, których celem jest podział komory technologicznej na poszczególne strefy badania przepływu strumienia powietrzno – piaskowego.

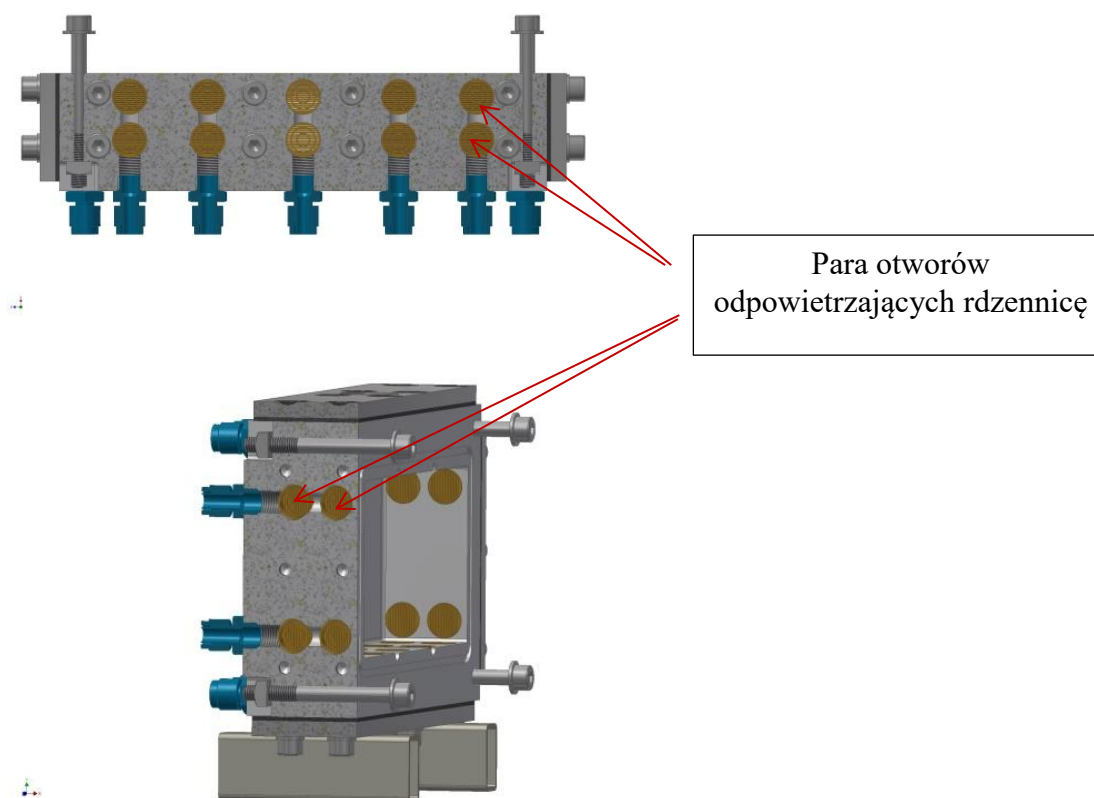


Rys. 21. Poglądowa konstrukcja nowo zaprojektowanej rdzennicy uwzględniająca rozmieszczenie otworów odpowietrzających (opracowanie własne).

W rdzennicy wykonano 26 otworów do osadzania korków odpowietrzających. Zastosowano typowe korki odpowietrzające o średnicy 18 mm. Według atestu

producenta pojedynczy korek odpowietrzający o przyjętej średnicy ma procentową wartość powierzchni czynnej odpowietrzenia wynoszącą 15,69 %), co odpowiada powierzchni przekroju równej 39,93 mm². System otworów wraz z korkami odpowietrzającymi jest połączony z kanałami wylotowymi K1 do K6.

Zaprojektowany układ kanałów odpowietrzających wraz z korkami przedstawiono na rysunku 22.



Rys. 22. *Sposób połączenia kanałów otworów odpowietrzających w rdzennicy (opracowanie własne).*

Kolejną zmianą wprowadzoną do nowej rdzennicy są przegrody dzielące objętość technologiczną na 3 sektory. Przegrody wzorowane były na kształtach stosowanych w poprzednich badaniach. Pojemności sektorów były równe i wynosiły po 250,57cm³.

Widok nowej rdzennicy z zestawem przegród możliwych do zastosowania przedstawiono na rysunku 23 (foto).



Rys. 23. Widok nowej rdzennicy z zestawem przegród służących do podziału wnętrza na 3 sektory o różnym kształcie, położeniu i wymiarach otworów przepływowych (opracowanie własne).

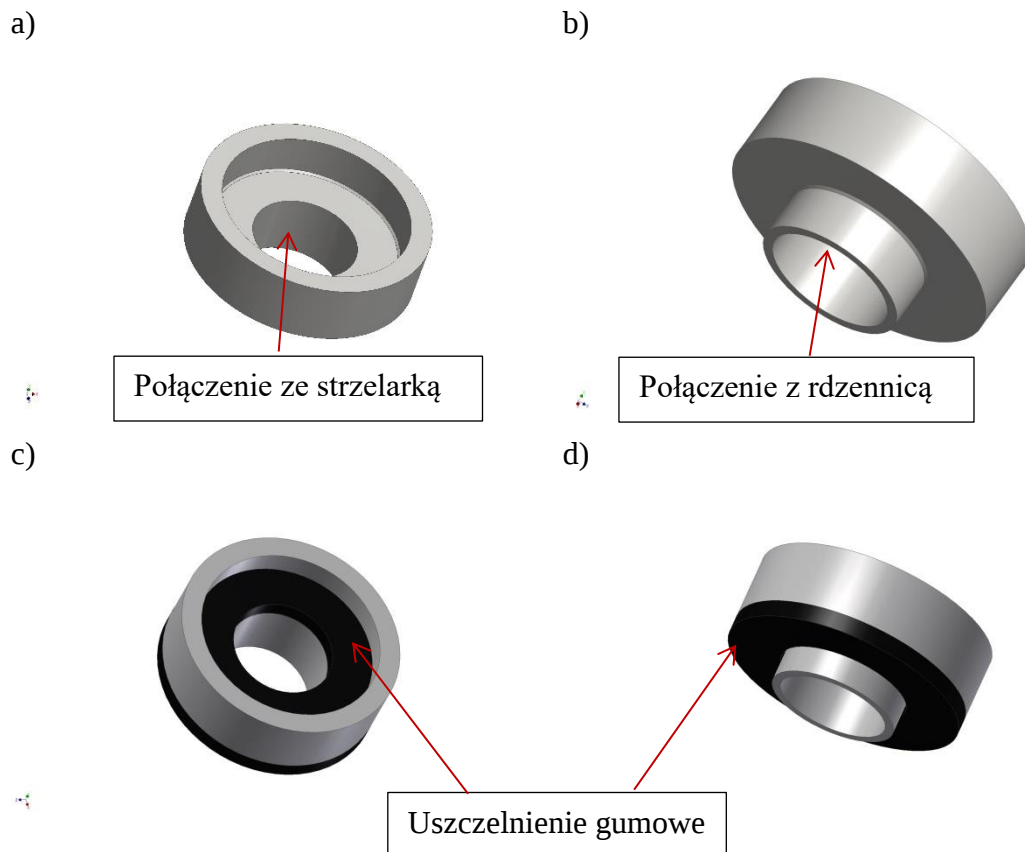
10.4. Koncepcja projektowo - wykonawcza instalacji pneumatycznej

Instalacja pneumatyczna przystosowana jest do połączenia strzelarki i rdzennicy z układem nadciśnienia oraz rdzennicy z układem podciśnienia. Układ z nadciśnieniem składa się z następujących elementów:

- główny zbiornik ($V = 100 \text{ dm}^3$) nadciśnienia połączony instalacją rurową z pośrednim zbiornikiem ($V = 20 \text{ dm}^3$). Parametry instalacji rurowej określone na podstawie obliczeń uwzględniających: wydatek, spadek ciśnienia, przekrój, długość odcinków łączących DN32,
- zbiornik pośredni podłączony instalacją rurową DN25 poprzez zawór (Hansberga) z strzelarką SR-3D,
- dwustronna przekładka stalowa o średnicy wewnętrznej $\varnothing 45 \text{ mm}$, do połączenia z otworem strzałowym oraz cylindryczny występ zewnętrzny

o wymiarze $\varnothing 29$ mm do połączenia z rdzennicą. Przekładka uzbrojona dwustronnie w uszczelki gumowe uszczelniające i centrujące rdzennicę w stosunku do otworu strzałowego,

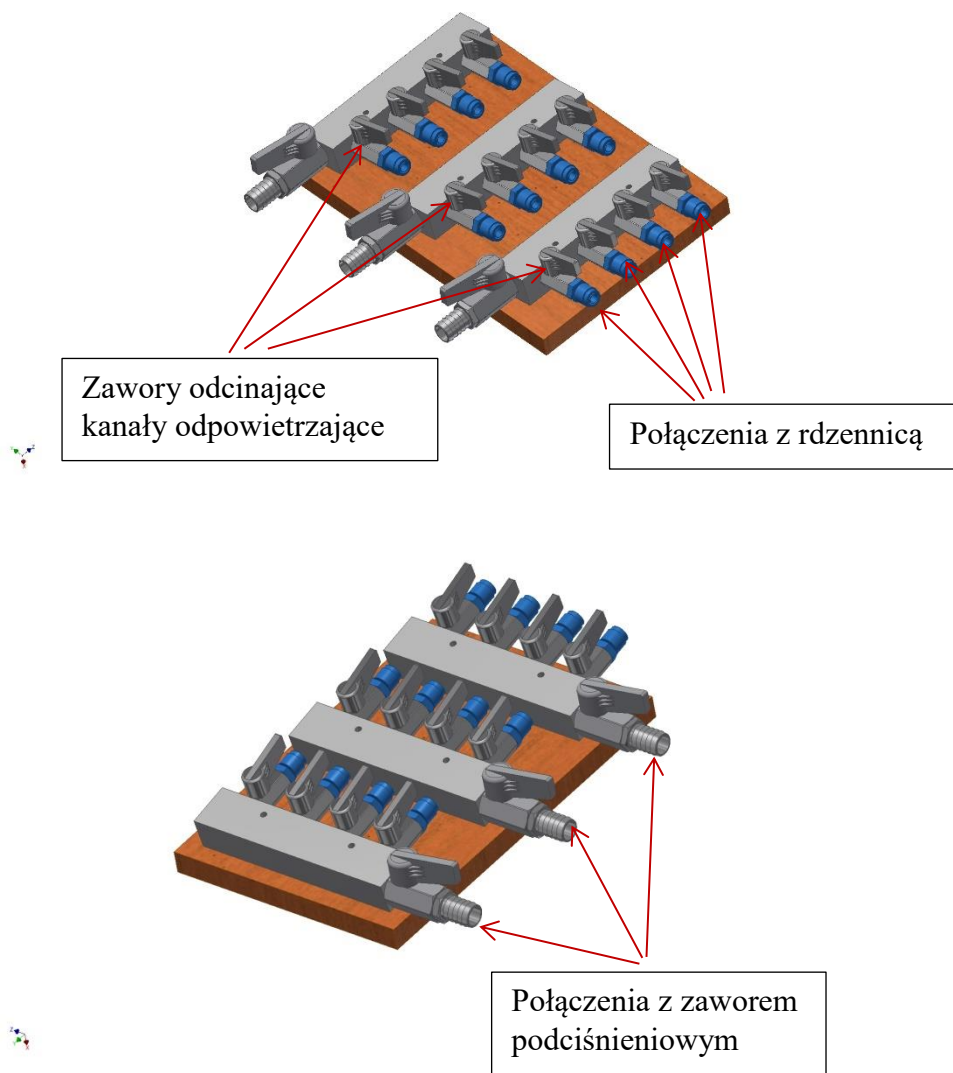
Wygląd zaprojektowanej przekładki przedstawiono na rysunku 24.



Rys. 24. Projekt nowej przekładki stalowej: a), b) bez uszczelnień gumowych, c), d) z uszczelnieniem gumowym (opracowanie własne).

- połączenie rdzennicy z kolektorem zbiorczym korków odpowietrzających rdzennicę. Ilość przyłączy 13 o średnicy DN10. Parametry instalacji rurowej określone na podstawie obliczeń uwzględniających: przekrój, długość odcinków łączących. Konstrukcja kolektora zbiorczego pozwala na kontrolowane zmiany odłączania kanałów odpowietrzających.

Schemat nowego kolektora zbiorczego przedstawiono poglądowo na rysunku 25.



Rys. 25. Poglądowy rysunek kolektora zbiorczego (opracowanie własne).

- zawór podciśnieniowy (elektromagnetyczny) łączący kolektor zbiorczy z zbiornikiem pośrednim ($V = 20 \text{ dm}^3$) podciśnieniowym,
- połączenie zbiornika pośredniego ($V = 20 \text{ dm}^3$) podciśnieniowego ze zbiornikiem głównym ($V = 100 \text{ dm}^3$) podciśnieniowym. Parametry instalacji rurowej określone na podstawie obliczeń uwzględniających: przekrój, długość odcinków łączących DN32,
- połączenie zbiornika podciśnieniowego ($V = 100 \text{ dm}^3$) głównego z pompą próżniową (model - VRU15-20, wydajność ssania $20 \text{ dm}^3/\text{min}$, moc $P = 0,55 \text{ kW}$, 220V). Parametry instalacji rurowej określono na podstawie

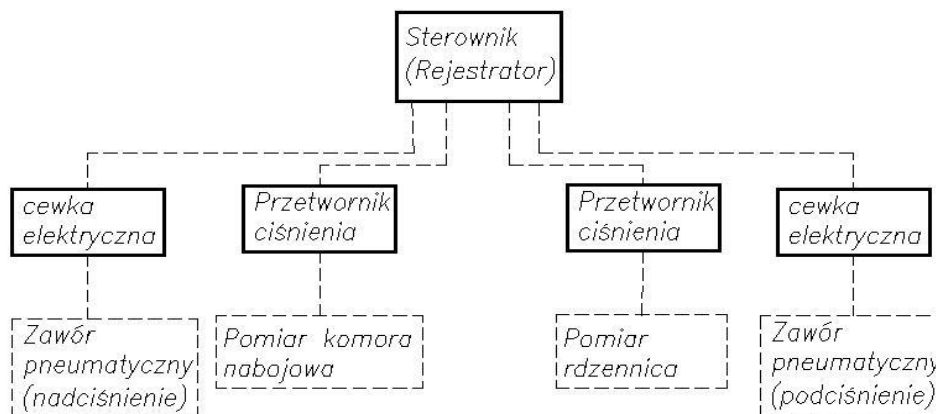
obliczeń uwzględniających: przekrój i długość odcinków łączących o średnicy DN32.

10.5. Koncepcja układu pomiarowego i rejestrującego

Do pomiaru ciśnienia wykorzystano instalację stosowaną w dotychczasowych badaniach AGH [32, 34, 38, 36, 42, 47, 50, 97]. Cecha charakterystyczna instalacji jest układ techniczny utworzony z: przetworników ciśnienia, elementów (cewki) uruchamiających zawory pneumatyczne nadciśnienia i podciśnienia, sterownika, wyświetlacza dotykowego i instalacji elektrycznej. W projekcie układu technicznego uwzględniono następujące pozycje:

- przetworniki ciśnienia nadciśnienia i podciśnienia (3szt.); Wika A-10 zakres pomiarowy -1...10 bar, sygnał wyjściowy zakres 0...10 V, 14...30 V, 0...8 mA, nieliniowość 0,5 %,
- cewki w połączeniu z zaworami w instalacji pneumatycznej,
- nadciśnienia: zawór typu zawór typu „hansberg”,
- podciśnienia: zawór elektromagnetyczny odcinający, normalnie zamknięty 3/4” 12V, S3010.04 - 12VDC,
- sterownik dopasowany do dwóch układów nadciśnienia i podciśnienia działający w zakresie 300-1000 hPa (mbar), wyposażony w wyświetlacz dotykowy: Horner XL4e. Charakterystyka sterownika ujmuje zależność w układzie oś x = natężenie prądu, oś = y ciśnienie. Pracują w zakresie zmian liniowych,
- instalacja elektryczna przewodowa łącząca elementy układu technicznego.

Schemat głównych elementów instalacji pomiarowej i rejestrującej przedstawiono na rysunku 26.



Rys. 26. Schemat głównych elementów instalacji pomiarowej i rejestrującej.

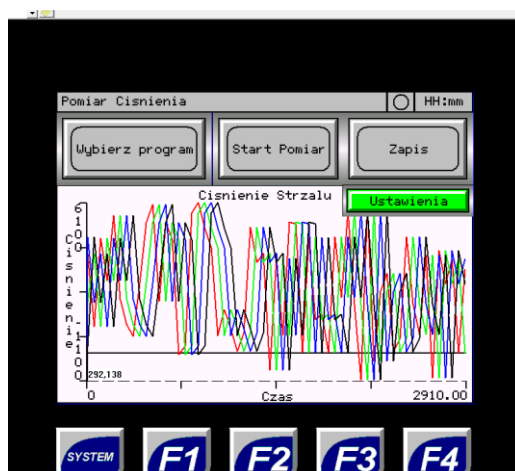
Schemat instalacji oddaje funkcjonalność działania elementów i ich rolę w układzie instalacji nadciśnienia i podciśnienia. Zastosowanie sterownika dotyczy nie tylko momentu otwarcia zaworu oraz dodatkowo możliwości zmiany przedziału czasu od otwarcia do zamknięcia zaworów.

Widok układu sterowania zaworami pneumatycznymi oraz przetwornikami ciśnienia w komorze nabojaowej i rdzennicy przedstawiono na rysunku 27. Przykładowo na wyświetlaczu dotykowym (rys.27) dostępne są dwie funkcje: pierwsza dotyczy pomiaru ciśnienia w komorze nabojaowej i rdzennicy natomiast druga dotyczy pomiaru siły naporu strumienia piaskowo powietrznego uderzającego w wewnętrzną płaszczyznę „rdzennicy” położonej naprzeciwko otworu strzałowego.



Rys. 27. Widok ekranu startowego wyświetlacza.

Na kolejnym rysunku 28, na ekranie wyświetlacza uwidoczniła jest sekwencja działania pomiaru " Start Pomiar ". W wyniku zadziałania sygnału następuje wzbudzenie dwóch elektrozaworów: pierwszy uruchamia zawór typu „hansberg” w instalacji nadciśnienia i następuje przepływ powietrza do komory nabojojowej. Drugi zawór w instalacji podciśnienia inicjuje przepływ powietrza z rdzennicy w kierunku zbiornika, w którym panuje ciśnienie mniejsze od ciśnienia otaczającego powietrza.



Rys. 28. Widok ekranu uruchamiającego proces.

Sygnały procesowe wynikające z sekwencji uruchamiania instalacji będą rejestrowane i archiwizowane w pamięci zewnętrznej operatora w układzie plików na dysku zewnętrznym.

11. Badania wstępne wstrzeliwania masy testowej na zmodernizowanym stanowisku laboratoryjnym

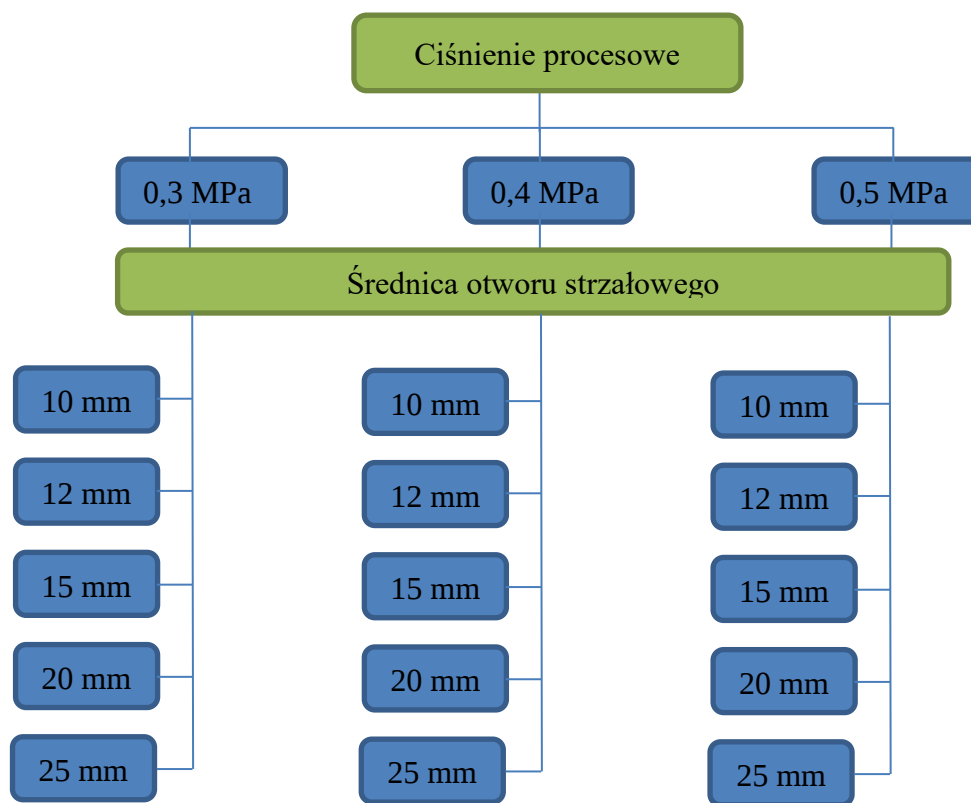
11.1. Metodyka prowadzonych badań

W programie badań wstępnych uwzględniono pozycje dotyczące poprawności działania stanowiska z instalacją z nadciśnieniem. W strukturze działania stanowiska poddano sprawdzeniu sekwencję połączenia i parametry działania następujących elementów:

- zbiornik ciśnieniowy: objętość, ciśnienie powietrza wydajność (objętościowe natężenie wypływu),
- zawór strzałowy: przekrój otwarcia, przepustowość, dynamika otwarcia,
- zbiornik strzałowy: objętość, przekrój czynny perforacji w wkładce przylegającej do wewnętrznych ścian zbiornika, zmniejszającej siły tarcia przesuwania się słupa masy w komorze naboowej podczas strzału,
- otwór strzałowy: przekrój, geometria kształtu,
- stalowa przekładka uzbrojona dwustronnie w uszczelki gumowe uszczelniająca i centrująca rdzennicę w stosunku do otworu strzałowego,
- rdzennica: geometria komory technologicznej i przegrody dzielące na strefy, przekroje i geometria rozłożenia korków odpowietrzających z możliwością strefowego zamykania wypływu powietrza.

Uzupełnieniem postępowania przygotowawczego do badań procesowych stanowi sprawdzenie szczelności połączeń za pomocą ultradźwiękowego detektora do wykrywania nieszczelności w instalacjach gazowych (typ DUOY 26A). Detektor tego urządzenia jest przystosowany do warunków ogólnie dostępnych typu mobilnego np. laboratorium.

Kolejną pozycję badań wstępnych stanowiło uzyskanie danych do charakterystyki ciśnienia w komorze naboowej i w przestrzeni technologicznej rdzennicy w zależności od ciśnienia roboczego i średnicy otworów strzałowych. Program badań zrealizowano według następującego schematu (rys.29):



Rys. 29. Parametry procesowe badań wstępnych (opracowanie własne).

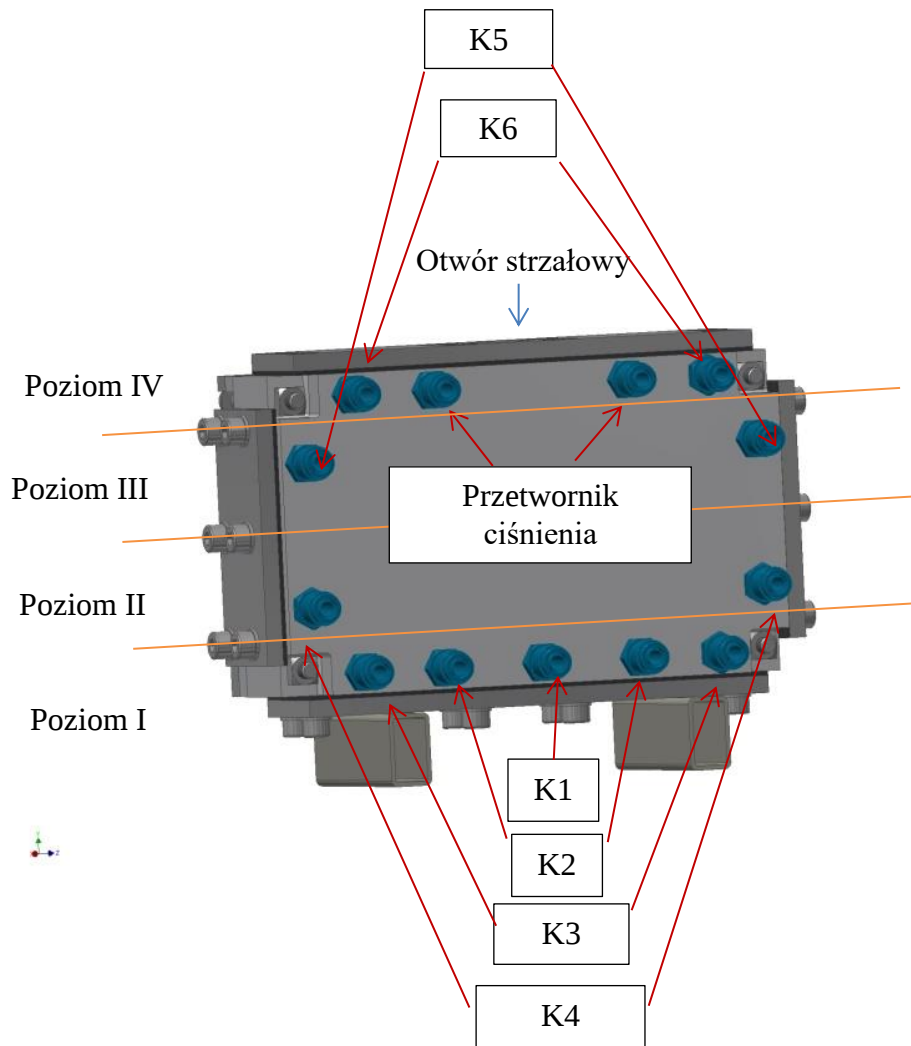
Badania prowadzono przy różnych nastawach ciśnienia, kolejno o wartości 0,3; 0,4; 0,5MPa, z uwzględnieniem średnic otworu strzałowego, które wynosiły: 10, 12, 15, 20, 25mm. Wartości ciśnienia były mierzone przetwornikami ciśnienia zainstalowanymi oddzielnie na zbiorniku strzałowym i komorze technologicznej.

Stosowano dodatkowo kontrolę wypływu powietrza z rdzennicy przez zamykanie kolejnych par otworów odpowietrzających. Kolejność zamykania par otworów (kanałów) oznaczono numeracjami K1, K2, K3, K4, K5, K6, które konstrukcyjnie zostały usytuowane na poziomach od I do IV (rys. 30).

Na zaznaczonym pierwszym (I) poziomie rdzennicy jest umieszczonych 10 otworów odpowietrzających, z których w pierwszej kolejności zamykane są 2 otwory – oznaczenie K1. Na tym samym poziomie w dalszej kolejności może podlegać zamykaniu odpowiednio 6 i 10 otworów, oznaczonych, jako K2, K3.

Na poziomach II i III znajdują się po 4 otwory, które są zamykane w kolejności oznaczeń K4 i K5.

Na górnym poziomie IV znajduje się 8 otworów, z których cztery są włączone do procedury zamykania oznaczonej K6. Do pozostałych czterech otworów podłączony jest przetwornik ciśnienia. Otwory te pozostają zamknięte podczas całego procesu badawczego. Łącznie podczas badań proces odpowietrzania wnęki technologicznej może być stymulowany przez operowanie za pomocą program zamykania obejmującego 22 otwory odpowietrzające.



Rys. 30. Schemat opcji zamykania otworów odpowietrzających zgodnie dokonany opisem (opracowanie własne).

W tabeli 4 podano liczbę otworów i potencjalne powierzchnie odpowietrzeń, które odpowiadają oznaczeniom zaznaczonym na rysunku 30.

Tabela 4. Zestawienie liczby otworów odpowietrzających oraz powierzchni odpowietrzenia przynależnej do określonego kanału.

Wyznaczenie układu odpowietrzeń	Oznaczenie kanału odpowietrzającego						
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	$\Sigma(K1 \div K6)$
Ilość korków (otworów) odpowietrzających	2	4	4	4	4	4	22
Powierzchnia odpowietrzenia [mm ²]	79,3	158,7	158,7	158,7	158,7	158,7	872,8

W tabeli 5 podano wartości czynnej powierzchni otwartych otworów odpowietrzających przypisanych do poszczególnych 4 poziomów rozmieszczenia odpowietrzeń w rdzennicy.

Tabela 5. Oznaczenie przynależności otworów odpowietrzających do wyznaczonych poziomów zaznaczonych na rys.30 ze wskazaniem na powierzchnię odpowietrzenia rdzennicy.

Poziom układu odpowietrzeń	Oznaczenie kanału odpowietrzającego	Ilość korków (otworów) odpowietrzających	Łączna powierzchnia odpowietrzenia [mm ²]
Poziom I	K1,K2,K3	10	396,7
Poziom II	K4	4	158,7
Poziom III	K5	4	158,7
Poziom IV	K6	4	158,7

11.2. Wyniki badań wstępnych i ich analiza

Do sporządzenia charakterystyki układu pneumatycznego stanowiska wyniki pogrupowano ze względu na warunki podłączenia otworów odpowietrzających. W pierwszym wariancie wszystkie otwory odpowietrzające były otwarte i umożliwiały swobodny przepływ strumienia powietrznego od doprowadzenia do rdzennicy oraz wylotu z niej. W drugim wariancie otwory były częściowo odcinane według określonego i zamierzonego systemu wyłączania zespołów odpowietrzalników.

W pierwszym wariancie, ze względu na złożoność metodyki pomiaru i dość znaczną licznosc zbioru danych, sporządzono arkusze w programie Excel z uwzględnieniem kombinacji połączenia kolejnych otworów strzałowych ułożonych w szeregu rosnących średnic. Do typoszeregu średnic stosowano kolejne wartości ciśnienia zasilającego, natomiast wielkością mierzoną była zmiana wartości ciśnienia w komorze naboowej (strzałowej) i rdzennicy.

W badaniach postępowano według schematu zaznaczonego w tabeli 6. Na podanym schemacie została uwzględniona średnica otworu strzałowego, od którego powierzchni zależy stopień odpowietrzenia determinowany przez różną liczbę otwartych odpowietrzalników.

Stopień odpowietrzenia wnętrza rdzennicy definiuje się stosunkiem sumarycznej powierzchni otworów odpowietrzających $\sum f_2$ (wylotowych), do powierzchni otworu strzałowego lub sumy otworów strzałowych $\sum f_1$. Zalecane w literaturze teoretyczne wartości stopnia odpowietrzenia dla strzelarek określone są w przedziale $0,3 \div 0,5$, natomiast w praktyce stosuje się wartości mieszczące się w przedziale $0,5 \div 1,0$.

Zamieszczone dane ilustrują fakt, że dla danej średnicy dostępnych jest sześć różnych grup liczby odpowietrzeń, zawierających kolejno: 22, 18, 14, 10, 6 i 2 korki odpowietrzające. Przyjmując dla przykładu średnicę otworu strzałowego $d = 10$ mm (powierzchnia $78,54 \text{ mm}^2$), kolejne stopnie odpowietrzenia mają wartości mieszczące się w przedziale od $S_p = 11,11$ (22 otwory) do $S_p = 1,01$ (2 otwory). W tabeli 6 zawarto obliczone i dostępne w badaniach procesowych stopnie odpowietrzenia.

Tabela 6. Parametryzacja stopnia odpowietrzania rdzennicy w zależności od średnicy, powierzchni otworów strzałowych oraz liczby otwartych odpowietrzeń.

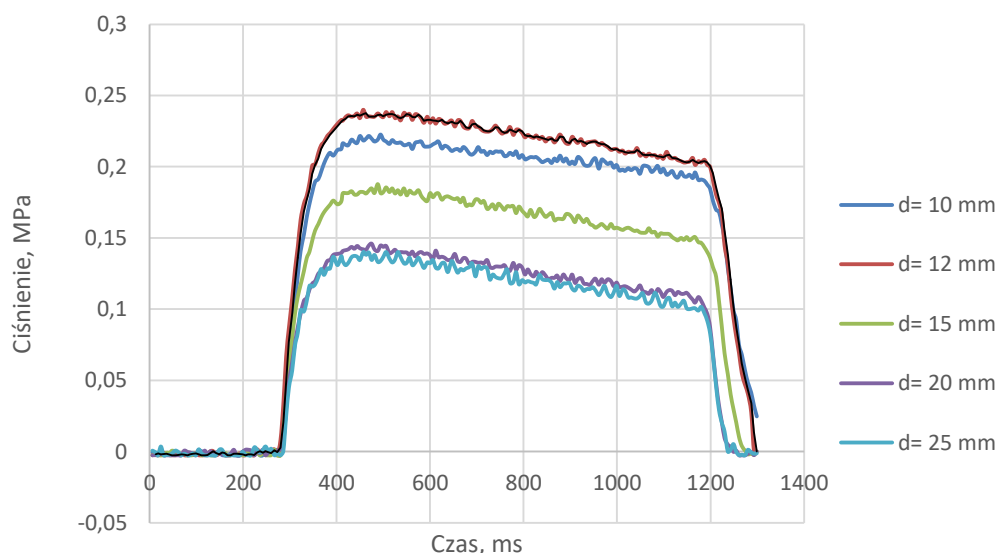
			$\sum f_2$	$\sum f_2 / \sum f_1$	$\sum f_2$	$\sum f_2 / \sum f_1$	$\sum f_2$	$\sum f_2 / \sum f_1$	$\sum f_2$	$\sum f_2 / \sum f_1$	$\sum f_2$	$\sum f_2 / \sum f_1$	$\sum f_2$	$\sum f_2 / \sum f_1$
			otw. Odp		otw. Odp		otw. Odp		otw. Odp		otw. Odp		otw. Odp	
średnica	$\sum f_1$		22		18		14		10		6		2	
10	78,54	mm ²	872,8	11,11	714,1	9,09	555,4	7,07	396,7	5,05	238	3,03	79,3	1,01
12	113,10			7,72		6,31		4,91		3,51		2,10		0,70
15	176,71			4,94		4,04		3,14		2,24		1,35		0,45
20	314,16			2,78		2,27		1,77		1,26		0,76		0,25
25	490,87			1,78		1,45		1,13		0,81		0,48		0,16

Na podstawie zgromadzonych danych dotyczących zmiany ciśnienia i doboru średnic otworu strzałowego wykonano stosowne charakterystyki. Zbiór charakterystyk obrazujących przebiegi ciśnienia w komorze naboowej i rdzennicy dla różnych średnic

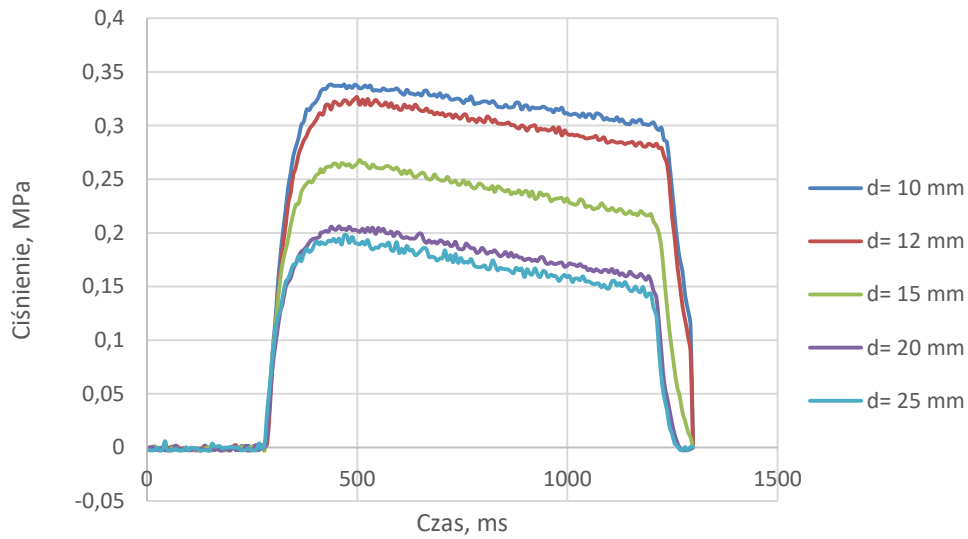
otworów strzałowych i zadanych ciśnień roboczych wynoszących kolejno 0,3; 0,4; 0,5MPa przedstawiono przykładowo na rysunkach 31, 32, 33. Zamieszczone dalej wykresy obrazują przebiegi ciśnienia granicznego zarówno w komorze nabojoyej jak również w rdzennicy przy pracy „na biegu jałowym”, czyli bez udziału masy rdzeniowej. Można zauważyć spadek wartości ciśnienia w czasie pomiaru zaznaczony na osi x, co jest związane z wyczerpywaniem się „zapasu” sprężonego powietrza w zbiorniku wyrównawczym strzelarki. Można przyjąć, że czas narastania ciśnienia do wartości maksymalnej wynosi około 150 ms i od tego momentu do końca otwarcia zaworu strzałowego ciśnienie równomiernie spada. Dane zamieszczone dalej obrazują wartości ciśnienia granicznego określone, jako średnie arytmetyczne obliczone w przedziale czasu pomniejszonego o czas narastania do wartości maksymalnej (ok. 150ms).

W każdej serii badań wyeksponowane są charakterystyki z podziałem na komorę nabojoyą i rdzennicę. W zbiorze charakterystyk wyróżniają się trzy podzbiory: górny, środkowy i dolny. W podzbiore górnym i dolnym charakterystyki znajdują się w bardzo bliskiej odległości względem siebie, wyznaczając przedział o określonym spadku ciśnienia w funkcji średnicy otworu strzałowego: 10, 12, 15, 20 oraz 25mm

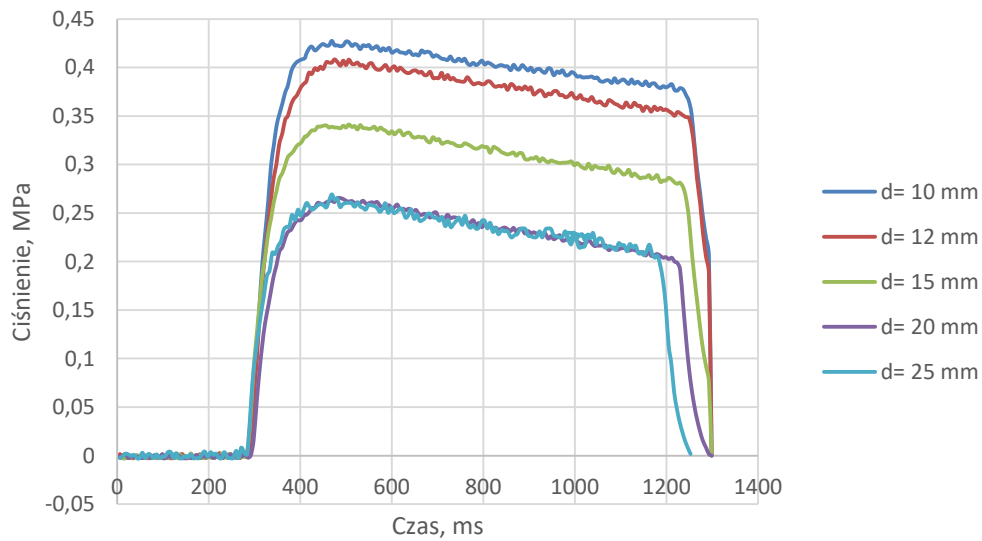
Poniżej zamieszczono zbiór charakterystyk obrazujących zmienność ciśnień granicznych powietrza w komorze nabojoyej dla ciśnienia roboczego 0,3-0,5MPa.



Rys. 31. Przebiegi ciśnienia granicznego w komorze nabojoyej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla różnych średnic „d” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym 0,3 MPa.



Rys. 32. Przebiegi ciśnienia granicznego w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla różnych średnic „d” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym 0,4MPa.



Rys. 33. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla różnych średnic „d” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym 0,5MPa.

Uwzględniając wartości zmian ciśnienia w funkcji średnicy otworów strzałowych, do kolejnego etapu z zamykanymi otworami odpowietrzającymi wytypowano otwory strzałowe o średnicy 10, 15, 25 mm. Uzasadnieniem tego wyboru średnic otworów strzałowych są istotne zmiany ciśnienia granicznego uwidocznione w charakterystykach. W tabelach 7 i 8 zawarto średnie wartości ciśnienia granicznego

zmierzone w komorze nabojoyej oraz w rdzennicy przy trzech wybranych ciśnieniach wstrzeliwania. Dane w tych tabelach odpowiadają średnim wartościom określonym z pomiarów na rysunkach 31, 32, 33 (komora nabojoya) oraz 34, 35, 36 (rdzennica). Natomiast w załączonym Albumie pod numerami 34, 35, 36 zawarto kontynuację numeracji rysunków i tabel, które ze względów edycyjnych zostały tu przesunięte, jako materiał pomocniczy.

Tabela 7. Wybrane wartości średniego ciśnienia w komorze $V_b = 3 \text{ dm}^3$.

Średnica otworu d_1 [mm]	Ciśnienie w komorze nabojoyej p_b [MPa]		
	$(p_r = 0,3 \text{ MPa})$	$(p_r = 0,4 \text{ MPa})$	$(p_r = 0,5 \text{ MPa})$
10	0,22	0,32	0,41
15	0,18	0,237	0,32
25	0,122	0,170	0,23

Tabela 8. Wybrane wartości średniego ciśnienia w rdzennicy $V_c = 0,817 \text{ dm}^3$ w zależności od ciśnienia roboczego.

Średnica otworu d_1 [mm]	Ciśnienie w rdzennicy p_s [MPa]		
	$(p_r = 0,3 \text{ MPa})$	$(p_r = 0,4 \text{ MPa})$	$(p_r = 0,5 \text{ MPa})$
10	0,095	0,019	0,025
15	0,0257	0,042	0,065
25	0,047	0,071	0,0975

Ciśnienia uzyskane przy zastosowaniu średnicy otworu strzałowego $d = 15 \text{ mm}$ ilustrują uzyskanie pewnego optimum dotyczącego jakości i skuteczności procesu dmuchowego realizowanego na stanowisku laboratoryjnym przed modernizacją. Z tych względów została ona wytypowana do kontynuacji badań na zmodernizowanym stanowisku.

Postępowanie takie jest uzasadnione ze względu na konieczność racjonalizacji ilości kontynuowanych badań w następnych etapach oraz do badania efektów zagęszczania masy rdzeniowej.

W drugim wariancie badań wstępnych w miarę postępu pomiarów stosowano zamykanie otworów odpowietrzających. Procedura zamykania otworów powodowała zmianę stopnia odpowietrzenia traktowanego, jako podstawowe kryterium

obowiązujące przy projektowaniu otworów strzałowych i otworów odpowietrzających. Kryterium to definiowane jest, jako stosunek przekroju odpowietrzenia do przekroju otworu strzałowego. Parametryzację stopnia odpowietrzenia nowej rdzennicy podano w tabeli 6. W tabeli kolorem zielonym zaznaczono wartości definiowanego kryterium zmieniającego się wraz z zamykaniem otworów odpowietrzających. Wartości te mieszczą się w przedziale $0,5 \div 1,0$ i są przyporządkowane do konstrukcji rdzennicy.

Z badań zaznaczonych w tabeli 6 oraz na rysunkach 31 do 33 wynika, że dla ustalonej wartości ciśnienia wstrzeliwania zwiększenie średnicy otworu strzałowego pociąga za sobą spadek ciśnienia granicznego ustalającego się w komorze naboowej, przy czym poziom spadku jego wartości spełnia generalnie zapis:

$$p_r^x = p_b,$$

gdzie $x = \log p_b / \log p_r$ - wykładnik wpływu średnicy otworu na ciśnienie w komorze.

Badania wskazują również, że dla uzyskania większego gradientu ciśnień w rdzennicy połączonej z systemem podciśnienia, bardziej korzystny jest taki układ, w którym następuje większy spadek ciśnienia na drodze komora naboowa - rdzennica. Taki układ pojawia się przy większych wartościach średnicy d_1 i większym stopniu odpowietrzenia układu.

Dopełnieniem tabeli 4 jest tabela 9 (system i kolejność zamykania otworów odpowietrzających) i rysunek 30 (schemat zamykania otworów odpowietrzających).

Tabela 9. Procedura zamykania otworów odpowietrzających.

	Warianty zamknięcia otworów odpowietrzających					
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Kanał odpowietrzający	K1	K1, K2	K1, K2, K3	K1, K2, K3, K4	K1, K2, K3, K4, K5	K1, K2, K3, K4, K5, K6
Powierzchnia odpowietrzenia [mm ²]	79,3	238	396,3	555	713,7	872,8

Zastosowane w tabeli oznaczenia Z1 do Z6 dotyczą kombinacji zamykanych kanałów odpowietrzających i wartości powierzchni odpowietrzenia dla poszczególnych wariantów pomiaru.

Zbiór danych z badań,, podobnie jak w pierwszym wariancie zapisano w arkuszu Excel na podstawie, którego sporządzono charakterystyki graficzne przedstawione na rysunkach 32 do 50. Charakterystyki ujęte w grupy przedstawiają zmienność ciśnień w funkcji średnic otworów strzałowych 10, 15, 25mm i zamykanych otworów odpowietrzających.

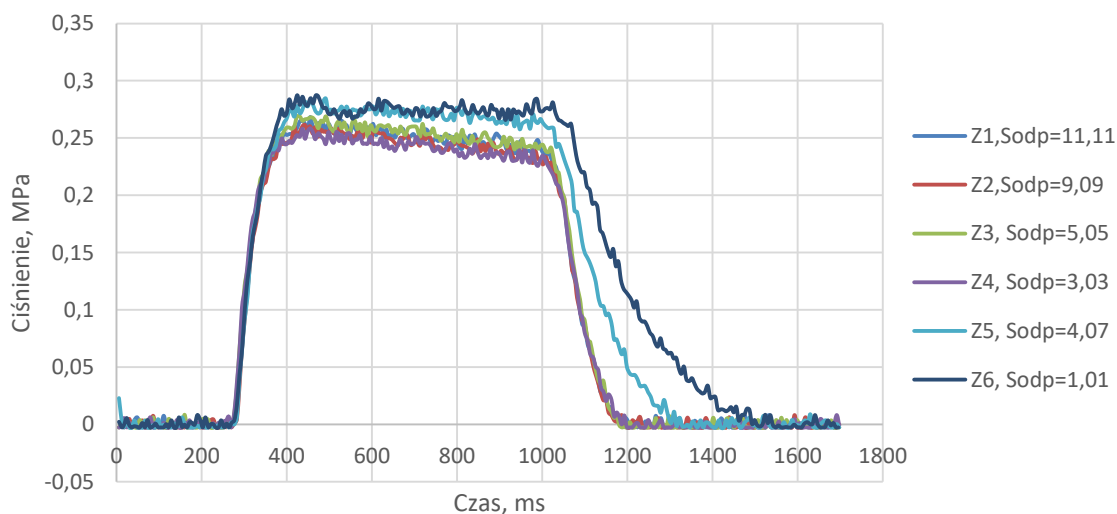
W kolejnych wydzielonych seriach pomiaru kierowano się dodatkowo zmianą stopnia odpowietrzenia rdzennicy (tabele 10 do 18). W wyniku grupowania uzyskano następujące dane dla średnic i wartości ciśnienia: średnica otworu $d = 10, 15$ i 25mm , zamknięte otwory Z1 do Z6, ciśnienie zasilania: 0,3; 0,4; 0,5MPa,

Pozycje ujęte w tabelach 10 do 18 przedstawiają wzajemne zależności, które były uwzględnione w programie badań. Kolorem zielonym zaznaczono wariant, według którego spełnione są warunki zalecanego stopnia odpowietrzenia dla strzelarek.

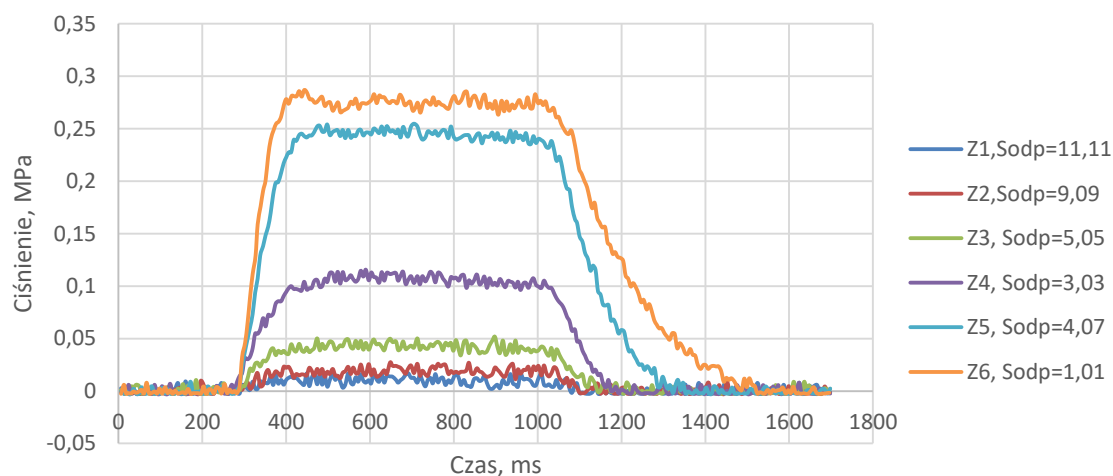
Sporządzony zbiór obejmuje charakterystyki dla ciśnienia strzału od 0,3MPa do 0,5MPa z zastosowanymi otworami strzałowymi $d = 10 - 25\text{mm}$ oraz z różnym stopniem odpowietrzenia rdzennicy uzyskanym przez zamykanie otworów odpowietrzających od Z1 do Z6 wg. schematu w tabeli 9. Na zamieszczonych rysunkach. Poszczególne krzywe dla danego otworu strzałowego reprezentują różne wartości stopnia odpowietrzenia od Z1 do Z6, ważne dla oceny, wpływu na badaną wielkość.

Tabela 10. Ciśnienie strzału 0,3MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 10\text{mm}$.

<i>Średnica i powierzchnia otworu strzałowego $d = 10\text{ mm}$, $\sum f_1 = 78,54\text{ mm}^2$</i>						
Otwory odpowietrzające	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Stopień odpowietrzenia	11,11	9,09	5,05	4,04	3,03	1,01
Powierzchnia otwartych otworów odpowietrzających [mm ²]	872,8	713,7	555	396,3	238	79,3



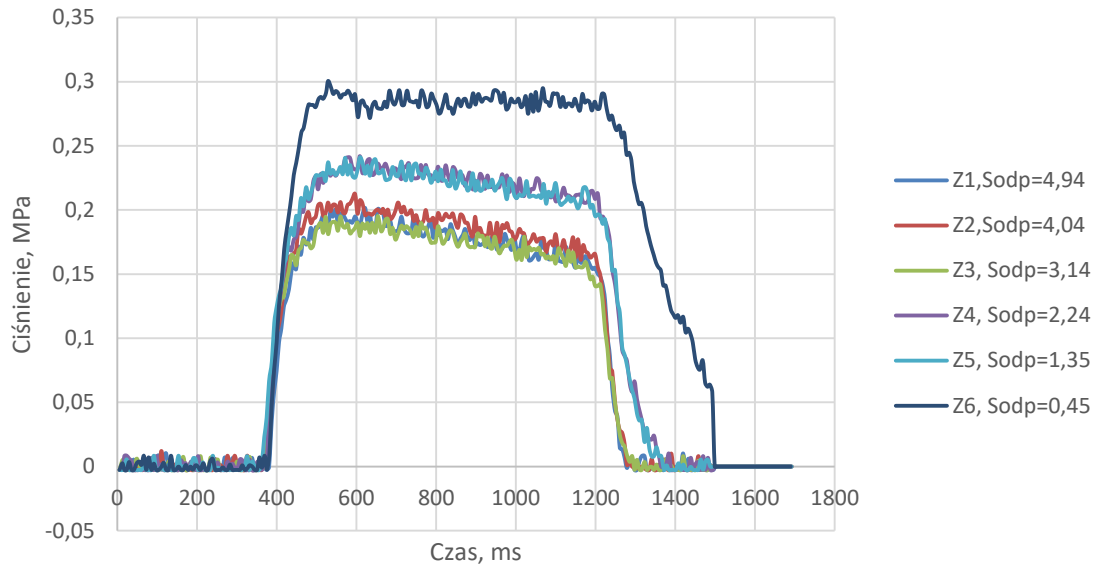
Rys. 37. Przebiegi ciśnienia w komorze nabojojowej $V_b = 3\text{dm}^3$ dla średnicy $d = 10\text{mm}$, ciśnienie strzału $0,3\text{MPa}$.



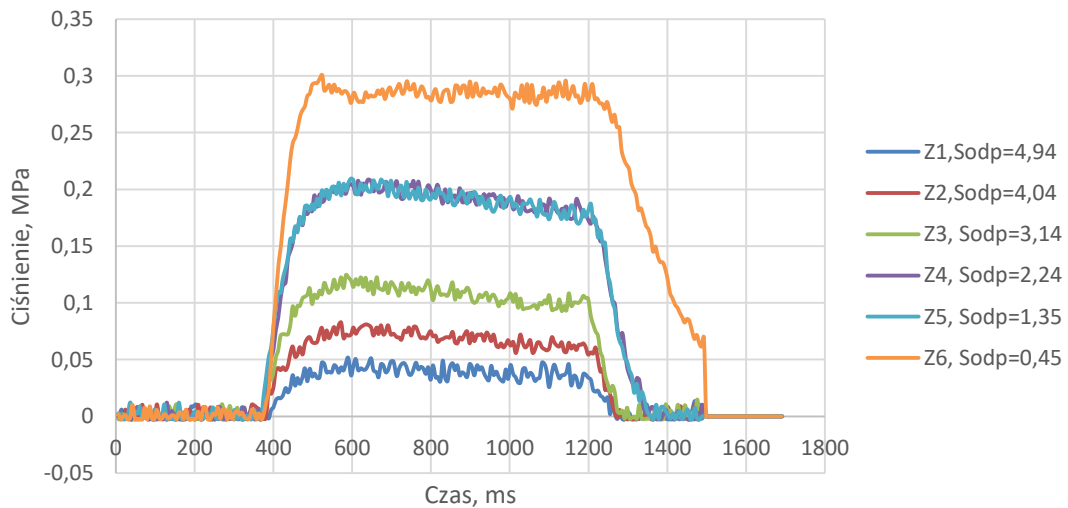
Rys. 38. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 10\text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,3\text{MPa}$.

Tabela 11. Ciśnienie strzału $0,3\text{MPa}$, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 15\text{mm}$.

Średnica i powierzchnia otworu strzałowego $d = 15\text{ mm}$, $\sum f_1 = 176,71\text{ mm}^2$						
Otworki odpowietrzające	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Stopień odpowietrzenia	4,94	4,04	3,14	2,24	1,35	0,45
Powierzchnia otworów odpowietrzających [mm^2]	872,8	713,7	555	396,3	238	79,3



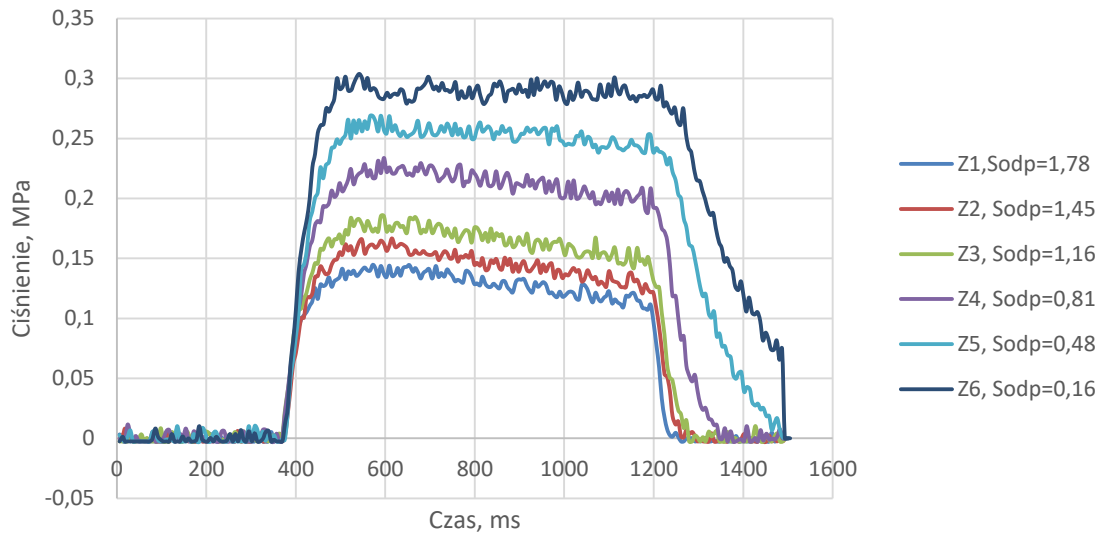
Rys. 39. Przebiegi ciśnienia w komorze nabojej $V_b = 3\text{dm}^3$ dla średnicy $d = 15\text{mm}$, ciśnienie strzału $0,3\text{MPa}$.



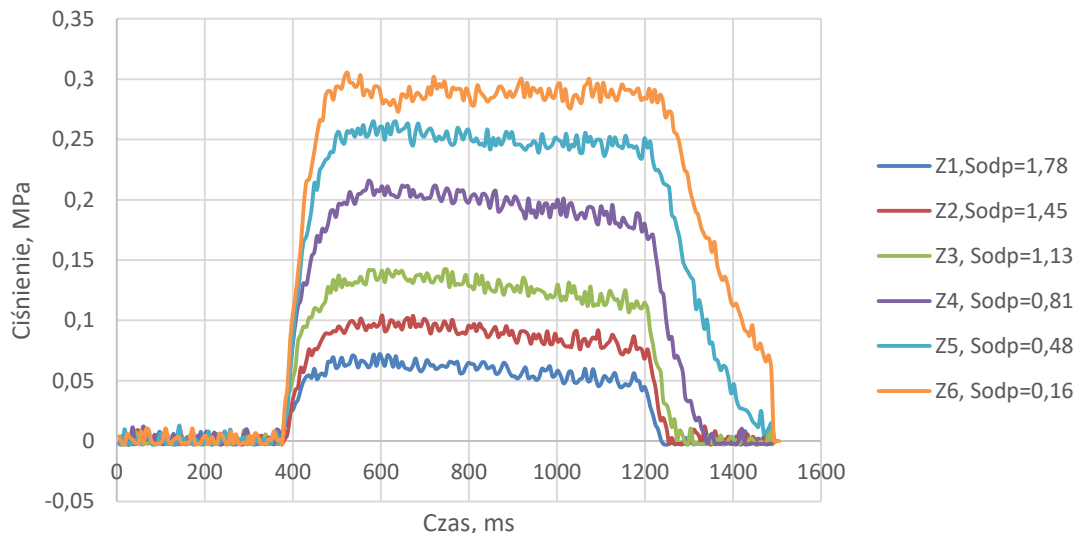
Rys. 40. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 15\text{mm}$, ciśnienie strzału $0,3\text{MPa}$.

Tabela 12. Ciśnienie strzału $0,3\text{MPa}$, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d=25\text{ mm}$.

Średnica i powierzchnia otworu strzałowego $d = 25\text{ mm}$, $\sum f_1 = 490,87\text{ mm}^2$						
Otworki odpowietrzające	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Stopień odpowietrzenia	1,78	1,45	1,13	0,81	0,48	0,16
Powierzchnia otworów odpowietrzających [mm^2]	872,8	713,7	555	396,3	238	79,3



Rys. 41. Przebiegi ciśnienia w komorze nabojejowej $V_b = 3\text{dm}^3$ dla średnicy $d = 25\text{mm}$, ciśnienie strzału $0,3\text{MPa}$.



Rys. 42. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 25\text{mm}$, ciśnienie strzału $0,3\text{MPa}$.

W Albumie dołączonym do pracy, jako Część 2. Kontynuacja zbioru charakterystyk dla ciśnienia $0,4$ i $0,5\text{MPa}$ z otworami strzałowymi $d = 10 - 25\text{ mm}$, podano analogicznie do powyższego opracowanie, w którym wykresy z krzywymi reprezentują wartości stopnia odpowietrzenia dla poszczególnych oznaczeń $Z1$ do $Z6$ wg. schematu w tabeli 9. W tym Albumie także zachowano kontynuację numeracji tabel oraz wzorów występującą w zasadniczym tekście rozprawy.

Podsumowanie wyników badania zmiany ciśnienia w komorze strzałowej i rdzennicy w funkcji otworu strzałowego oraz stopnia odpowietrzenia.

W doborze sumarycznej powierzchni odpowietrzeń kierowano się różnicą wartości ciśnienia granicznego w komorze naboowej oraz rdzennicy. Różnica ta decyduje o intensywności przebiegu procesu od momentu utworzenia strumienia powietrzno-piaskowego do momentu zapełnienia rdzennicy. Przy ustaleniu stopnia odpowietrzenia kierowano się zaleceniami przytoczonymi w literaturze, aby zapewnić utrzymanie w rdzennicy ciśnienia o wartości mniejszej od wartości krytycznej w stosunku do ciśnienia w komorze naboowej.

W grupie danych dotyczących komory naboowej charakterystyczne są:

- nieznaczna zmiana ciśnienia w funkcji otworu strzałowego (w przedziale użytych średnic),
- charakterystyczny, trapezowy kształt przebiegu ciśnienia w funkcji czasu, przy stałym czasie otwarcia zaworu strzałowego,
- zdecydowany przyrost ciśnienia w funkcji zmniejszonego odpowietrzenia wnętrza rdzennicy,
- zrównanie wartości ciśnienia w komorze i rdzennicy z ciśnieniem roboczym w instalacji, które następuje przy zamkniętych wszystkich otworach odpowietrzających.

W grupie danych dotyczących rdzennicy z podziałem na stopień odpowietrzenia występują zmiany rozkładu ciśnienia zależne od średnicy otworu strzałowego i ciśnienia roboczego, wykazujące następujące prawidłowości: dla określonych stanów i poziomu systemu odpowietrzania:

- a) Zamknięte otwory odpowietrzające rdzennicy na poziomie I (10 otworów zamkniętych):
- średnica 10 mm przy zamkniętych otworach Z1, Z2, Z3 i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa. Widoczny jest wzrost ciśnienia (0,04 - 0,06MPa), co jest związane ze zmniejszoną intensywnością odpływu powietrza przez pozostałe niezamknięte otwory,
 - średnica 15mm przy tym samym stopniu odpowietrzenia i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa. Następuje wzrost zmiany ciśnienia (0,11 - 0,22MPa),

który jest następstwem kolejnego zmniejszenia intensywności odpływu powietrza przez pozostałe niezamknięte otwory,

- średnica 25mm przy tym samym stopniu odpowietrzenia i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa. Wzrost zmiany ciśnienia (0,2 - 0,25MPa) jest zaburzony, co można tłumaczyć proporcją dopływającego powietrza przez otwór 25mm w stosunku do odpowietrzeń, w porównaniu do średnicy 15mm,
- b) Zamknięte otwory odpowietrzające rdzennicy na poziomie II (14 otworów zamkniętych):
- średnica 10mm przy zamkniętych otworach Z1, Z2, Z3, Z4 i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa. Rejestrowany jest wzrost ciśnienia (0,1 - 0,2MPa), co można tłumaczyć zmniejszoną intensywnością odpływu powietrza przez pozostałe niezamknięte otwory,
 - średnica 15mm przy tym samym stopniu odpowietrzenia i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa. Zwiększenie zmiany ciśnienia (0,2 - 0,42MPa), co można tłumaczyć kolejnym zmniejszeniem intensywności odpływu powietrza przez pozostałe niezamknięte otwory,
 - średnica 25mm przy tym samym stopniu odpowietrzenia i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa. Zmiana ciśnienia w przedziale (0,2 - 0,32MPa), jest zaburzona, co prawdopodobnie wynika ze zmiany proporcji dopływającego powietrza przez otwór 25mm w stosunku do odpowietrzeń, w porównaniu z sytuacją występującą dla średnicy 15mm,
- c) Zamknięte otwory odpowietrzające rdzennicy na poziomie III (18 otworów zamkniętych):
- średnica 10 mm przy zamkniętych otworach Z1, Z2, Z3, Z4 i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa. Widoczne jest zwiększenie ciśnienia (0,25 - 0,4MPa), co można tłumaczyć zmniejszoną intensywnością odpływu powietrza przez pozostałe niezamknięte otwory,
 - średnica 15mm przy tym samym stopniu odpowietrzenia i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa. Wzrost zmiany ciśnienia (0,2 - 0,43MPa), co można tłumaczyć kolejnym zmniejszeniem intensywności odpływu powietrza przez pozostałe niezamknięte otwory,

- średnica 25mm przy tym samym stopniu odpowietrzenia i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa, zmiana ciśnienia (0,2 - 0,35MPa), jest zaburzona, co można tłumaczyć proporcją dopływającego powietrza przez otwór 25mm w stosunku do odpowietrzeń, w porównaniu do średnicy 15 mm,
- d) Zamknięte otwory odpowietrzające rdzennicy na poziomie IV (22 otwory zamknięte):
- średnica 10 mm przy zamkniętych otworach Z1, Z2, Z3, Z4, Z6 i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa, rejestrowany jest wzrost ciśnienia (0,28 - 0,48MPa), do wartości ciśnienia zasilania,
 - średnica 15mm przy tym samym stopniu odpowietrzenia i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa, wzrost zmiany ciśnienia (0,3 - 0,48MPa), do wartości ciśnienia zasilania,
 - średnica 25mm przy tym samym stopniu odpowietrzenia i wartościach ciśnienia 0,3 - 0,5MPa, zmiana ciśnienia (0,3 - 0,46MPa), do wartości ciśnienia zasilania,
 - zrównoważenie ciśnień zasilania i w komorze wskazuje na szczelność układu komory naboowej i rdzennicy,
 - odpowietrzenie układu może nastąpić po zakończeniu procesu strzałowego, wtedy powietrze wypływa przez połączenie komory naboowej z rdzennicą lub otwarcie otworu odpowietrzającego.

Z przedstawionej analizy, na podstawie zgromadzonych wartości pomiarowych sporządzonych charakterystyk, nasuwają się następujące wnioski.

- rozkład ciśnienia w czasie zależy w różnym stopniu od wartości średnicy otworu strzałowego i ciśnienia roboczego oraz od stopnia odpowietrzenia rdzennicy,
- zarejestrowane zmiany ciśnienia dla średnic 10 i 15 mm otworu strzałowego wykazują określoną prawidłowość wzrostu, dla określonych poziomów zamykanych otworów odpowietrzających,
- dla średnicy 25mm i określonych poziomów otworów odpowietrzających wzrost ciśnienia jest zaburzony zmianą proporcji dopływającego powietrza i odpływającego przez niezamknięte otwory,

- na etapie tych badań do programu zasadniczego – technologicznego z masą, można przy uwzględnieniu dużej nierównomierności rozkładu gęstości w rdzeniu wstrzeliwanym przez pojedynczy otwór strzałowy wytypować układ z otworem strzałowym 15 mm oraz z poziomem odpowietrzenia odpowiadającym położeniu I i II zamykanych otworów do dalszych badań, co oznacza, że poziomy III i IV pozostają otwarte,
- prawidłowość tego wyboru, dla wskazanego modelu pomiarowego, dodatkowo wydaje się uzasadniać tym, że zalecane w literaturze dane dotyczące stopnia odpowietrzenia dla strzelarek są w przedziale $0,3 \div 0,5$, natomiast w praktyce w zakresie $0,5 \div 1,0$.

12. Badania technologiczne na stanowisku do zintegrowanego procesu dmuchowego nadciśnieniowo-podciśnieniowego

Kolejność i procedura przygotowania stanowiska badań obejmująca następujące warunki niezbędne do kontynuacji badań:

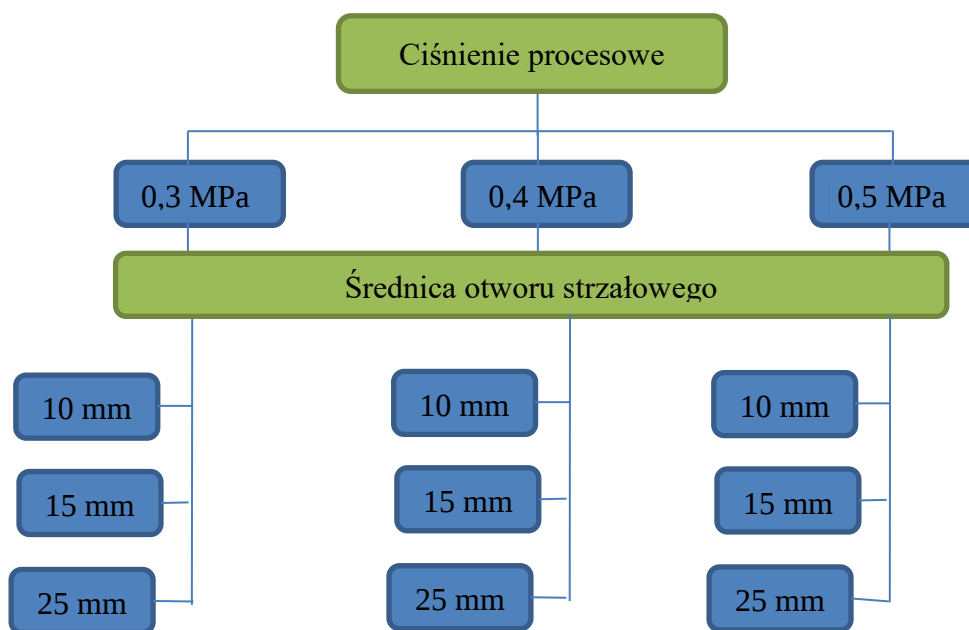
- 1) Pozytywna ocena funkcjonalnych zespołów stanowiska w wyniku przeprowadzonych prób w badaniach wstępnych.
- 2) Uzupełnienie stanowiska o układ pomiarowy z uwzględnieniem przetworników do pomiaru i rejestracji wartości ciśnienia w obydwu zróżnicowanych stanach procesu dmuchowo-podciśnieniowego wraz z zaprogramowaną sekwencją zintegrowanego procesu.
- 3) Podłączenia rdzennicy do układu strzelarki zgodnie z kryteriami technicznymi i technologicznymi zintegrowanego procesu. Konstrukcję rdzennicy scharakteryzowano w punkcie 10.3 i przedstawiono na rysunku 21.
- 4) Zastosowanie w rdzennicy wymiennych przegród z otworami, w celu podziału komory technologicznej – rdzennicy na tak zwane sektory modelujące sytuacje mogące występować w rzeczywistych rdzeniach, gdy zapełnianiu wnęk towarzyszy konieczność zmiany kierunku płynięcia strumienia piaskowo-powietrznego w kanałach o różnym przekroju. Przy czym należy wyjaśnić, że taki warunek zdecydowanie utrudnia wykazanie zalet układu podciśnieniowego ocenianych w aspekcie uzyskania równomiernego rozkładu gęstości, natomiast pozwala wykazać, w jakim stopniu, pomimo niekorzystnych warunków można wpływać na przemieszczanie strumienia fazy dwustopniowej we wnęce rdzennicy przez wywołanie określonego gradientu ciśnienia za pomocą aktywnego oddziaływania odpowiednich na ruch mieszaniny piaskowo-powietrznego w rdzennicy.
- 5) Sporządzenie masy testowej do utwardzania w technologii CO₂. Warunek zastosowania takiej masy jest uzasadniony zdobytym doświadczeniem z dotychczasowych badań laboratoryjnych.
- 6) Przygotowania masy rdzeniowej Cordis według karty technologicznej
- 7) w mieszarce wstępowej z następujących składników:
 - piasek kwarcowy 1k 0,20/0,16/0,32, – 100 cz. mas
 - żywica cordis– 2.2 cz. mas,

- anorgit 8322 – 1.2 cz. mas.

Zastosowanie metodyki określania ilości masy i sposobu oceny napełniania komory naboowej oraz stopnia wypełnienia rdzennicy masą. W tej metodyce podstawowym parametrem jest wagowe określenie ilości masy i sporządzenia bilansu przed i po procesie. W przypadku rdzennicy zapełnienie określone jest współczynnikiem zapełnialności [14, 15, 16, 27].

12.1. Program i wyniki porównawcze badań procesu dmuchowego nadciśnieniowego

Program badań technologicznych opracowany z wykorzystaniem wyników badań wstępnych realizowano przy założeniach podanych na schemacie (rys.55), na którym przedstawione są warunki procesowe, według których zmieniano zakresy ciśnienia i średnice otworu strzałowego. Wyeliminowano średnice otworu strzałowego 12 oraz 20mm, dla których zmiany ciśnienia były mało wyraziste i zbliżone do wartości uzyskiwanych przy otworach 10 i 25mm.

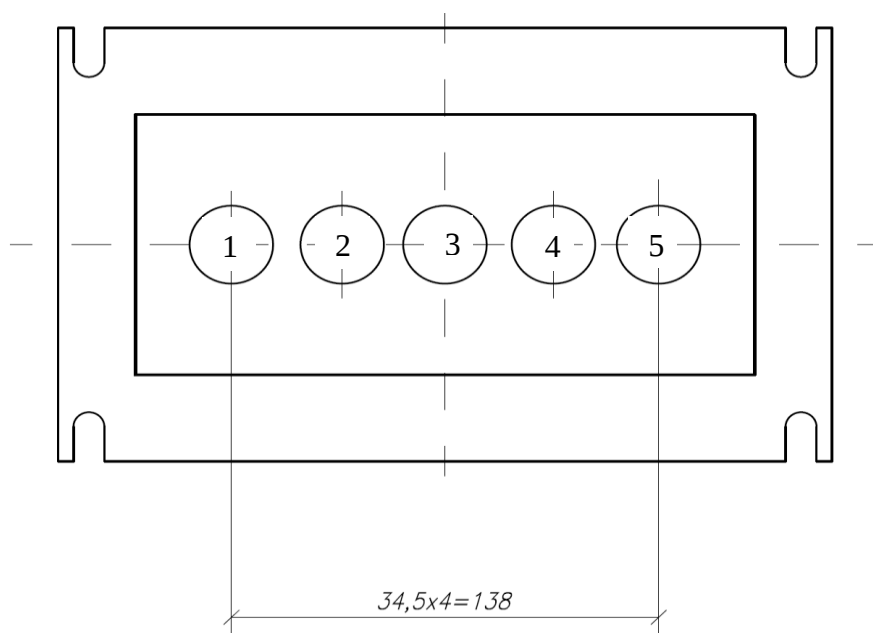


Rys. 55. Parametry procesowe badań z nadciśnieniem (opracowanie własne).

Przebieg badań technologicznie obejmował czynności związane z wykonaniem rdzenia i pomiarami efektu zagęszczenia. Do oceny efektu zagęszczenia przyjęto następujące kryteria:

- ilość wstrzelonej masy rdzeniowej do rdzennicy obliczonej z bilansu wagowego masy wprowadzonej do komory strzałowej i pozostałości po strzale,
- gęstość pozorna mierzona metodą sondowania próbnikiem objętościowym o małej grubości ścianki.

Pobieranie próbek do określenia rozkładu gęstości masy rdzeniowej w rdzennicy wykonano zgodnie ze schematem na rysunku 56. Z objętości i masy pobranych próbek z wyznaczonych miejsc sondowania (walec o średnicy $d = 29,8\text{mm}$, wysokość próbki odpowiadająca głębokości rdzennicy $g = 45\text{ mm}$) obliczono rozkład gęstości w sondowanych miejscach. Obliczona objętość próbki wynosiła $31,4\text{ cm}^3$.

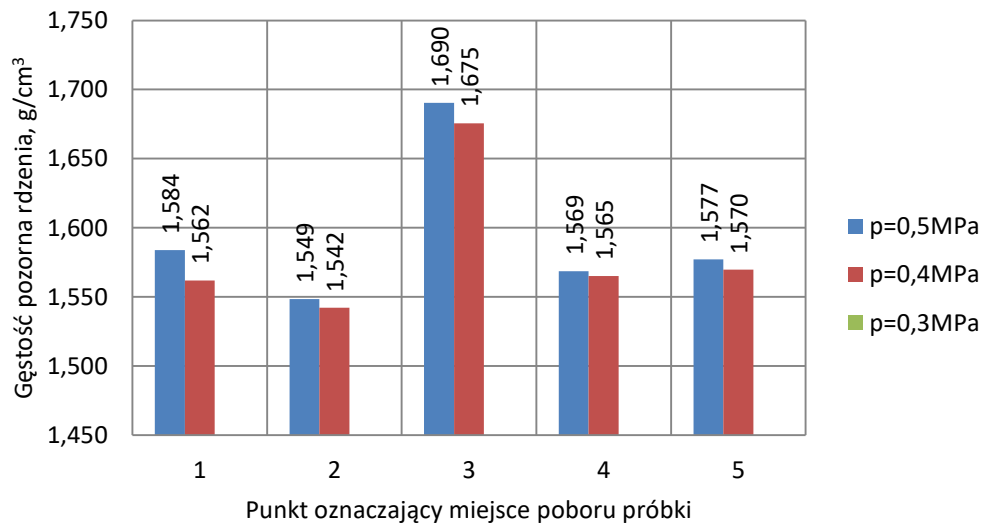


Rys. 56. Schemat miejsc pobierania próbek metodą sondowania, objętość próbki $31,4\text{cm}^3$.

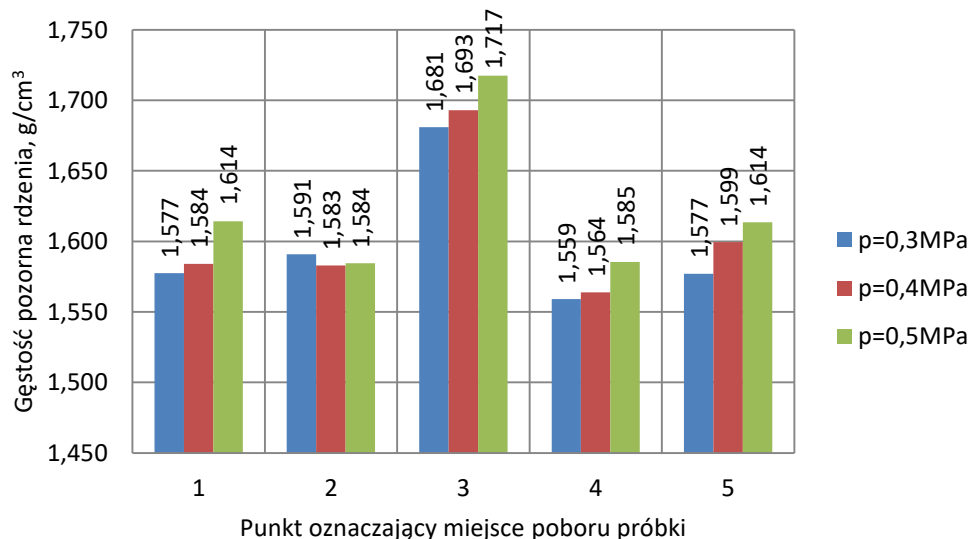
Ze zbioru pobranych próbek wykazujących określoną gęstość, wyznaczono wartość średnią, która wskazuje na zależność od ciśnienia powyżej ciśnienia atmosferycznego i otworu strzałowego.

Etap pierwszy badań

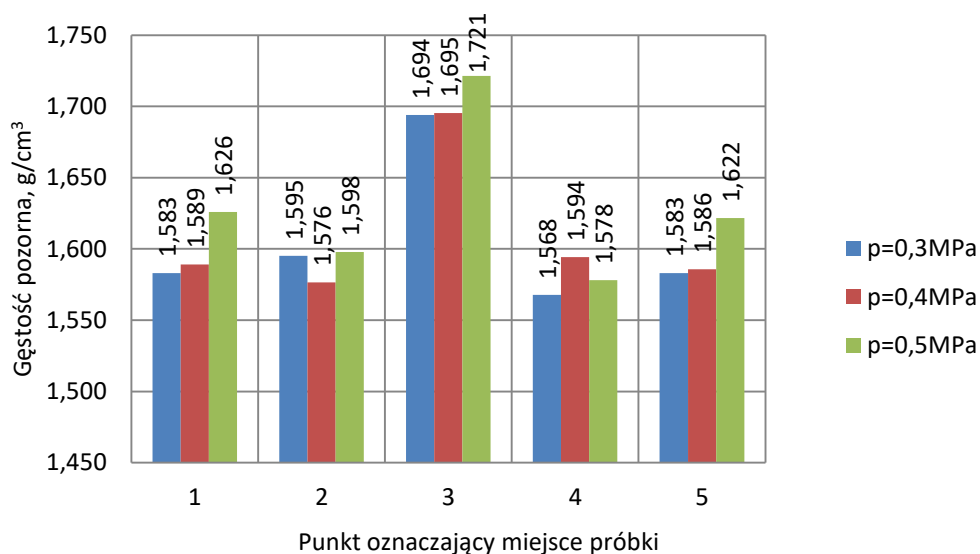
Ten etap przeprowadzono przy zadanych warunkach brzegowych dotyczących ciśnienia zasilania i średnic otworu strzałowego. Wyniki przedstawiono na rysunkach 57, 58, 59: ciśnienie zmieniano stopniowo 0,3; 0,4; 0,5MPa, przy stałej średnicy otworu strzałowego wynoszącej kolejno $d = 10, 15$ i 25mm .



Rys. 57. Rozkład gęstości dla otworu strzałowego $d = 10\text{ mm}$ przy ciśnieniu roboczym 0,3; 0,4; 0,5MPa. Odpowietrzenie $872,8\text{ mm}^2$, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 11,11$.



Rys. 58. Rozkład gęstości dla otworu strzałowego $d = 15\text{ mm}$ przy ciśnieniu roboczym 0,3; 0,4; 0,5MPa. Odpowietrzenie $872,8\text{mm}^2$, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 4,94$.



Rys. 59. Rozkład gęstości dla otworu strzałowego $d = 25\text{mm}$ przy ciśnieniu roboczym 0,3; 0,4; 0,5MPa. Odpowietrzenie $872,8\text{mm}^2$, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 1,78$

Tabela 20. Wartości średnich gęstości masy uzyskane przy całkowitym odpowietrzeniu rdzennicy wynoszącym $872,8\text{ cm}^2$.

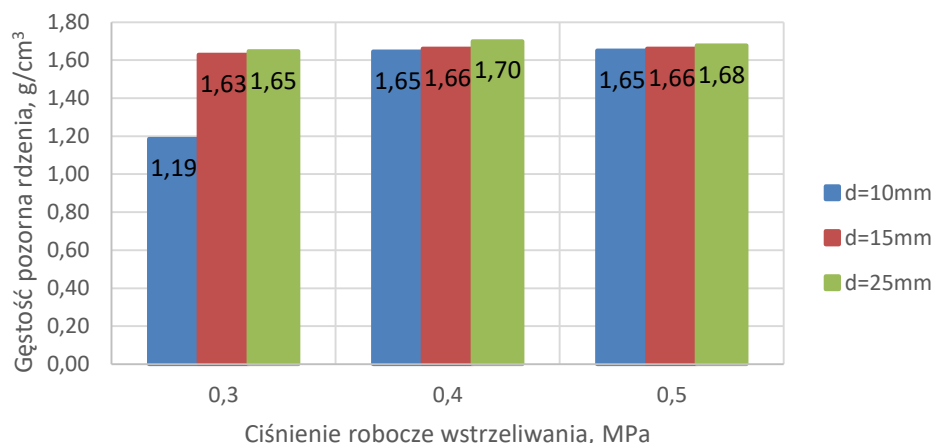
p = 0,3MPa						
Średnica otworu strzałowego d[mm]	Numer próbki					$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
10	-	-	-	-	-	-
15	1,577	1,591	1,681	1,559	1,577	1,597
25	1,583	1,595	1,694	1,568	1,583	1,605
p = 0,4MPa						
Średnica otworu strzałowego d[mm]	Numer próbki					$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
10	1,562	1,542	1,675	1,565	1,570	1,583
15	1,584	1,583	1,693	1,564	1,599	1,605
25	1,589	1,576	1,695	1,594	1,586	1,608
p = 0,5MPa						
Średnica otworu strzałowego d[mm]	Numer próbki					$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
10	1,584	1,549	1,690	1,569	1,577	1,594
15	1,614	1,584	1,717	1,585	1,614	1,623
25	1,626	1,598	1,721	1,578	1,622	1,629

Przedstawione wyniki w tabeli 20 przy pełnym odpowietrzeniu rdzennicy można uznać za charakterystyczne dla rdzennic zapełnianych przez pojedynczy otwór strzałowy. W tym przypadku obserwuje się zwiększone zagęszczenie masy w osi działania otworu strzałowego oraz symetrycznie malejące w miarę oddalania się od tej osi. Jako miarę do oceny wpływu parametrów procesu przyjmuje się wartość średniej gęstości przez odniesienie jego masy do objętości wnęki rdzennicy. Zwiększenie średnicy otworu strzałowego w pewnym przedziale wartości powoduje wzrost gęstości pozornej masy we wnęce technologicznej, podobnie jak zwiększenie ciśnienia powoduje przyrost gęstości pozornej w warunkach stosowania otworów strzałowych o mniejszej średnicy.

Rozkład gęstości dla poszczególnych otworów strzałowych i zadanych wartości ciśnienia ma podobny przebieg, lecz różni się wartościami w określonych miejscach poboru próbek. W konkretnych warunkach badań największe wartości gęstości lokalne występujące w osi otworu strzałowego w funkcji ciśnienia zmieniają się od $1,67\text{g/cm}^3$ do $1,72\text{g/cm}^3$. Największa wartość osiągała gęstość lokalna dla ciśnienia $0,5\text{MPa}$ i otworu 25mm .

Zbiorczy wykres obrazujący zmiany średniej gęstości pozornej w funkcji ciśnienia podano na rysunku 60. Przy zmianie ciśnienia $0,3$; $0,4$; $0,5\text{MPa}$ występuje zróżnicowanie wartości gęstości pozornej, która zmienia się w zależności od średnicy otworu strzałowego. Istotny wpływ na średnią gęstość ma stopień odpowietrzenia rdzennicy. W badaniach przyjęto wariant całkowitego odpowietrzenia (872cm^2), co przy stosunku do otworu strzałowego ($d_{10} = 78,54\text{cm}^2$; $d_{15} = 176,71\text{cm}^2$; $d_{25} = 490,87\text{cm}^2$) pozwoliło wykazać zwiększenie gęstości wzrastała wraz z średnicą otworu strzałowego.

Zjawisko niecałkowitego wypełnienia rdzennicy pojawia się przy ciśnieniu $0,3\text{MPa}$ i otworze 10mm . W tych warunkach dla określenia średniej gęstości masy, rozłożonej także w części niezapełnionej, zastosowano metodę wagowego bilansowania ilości masy użytej do procesu w jej odniesieniu do objętości rdzennicy (objętość rdzennicy $817,26\text{cm}^3$). Średnia gęstość wynosi $1,19\text{g/cm}^3$ (rysunek 60 słupek koloru niebieskiego) i można ją porównać do gęstości usypowej masy.



Rys. 60. Zależność średniej gęstości masy próbek testowych od ciśnienia roboczego.

Przykłady określenia średniej gęstości masy w rdzennicy na podstawie rys.60 oraz rysunków rozkładu gęstości. Słupek niebieski reprezentuje średnicę otworu strzałowego przy wartości ciśnienia 0,4MPa – odczyt $\rho_{sr} = 1,65$ (reprezentuje średnicę $d = 10\text{mm}$) gęstość określona liczona z objętości rdzennicy i ilości zważonej masy z komory technologicznej.

Natomiast średnią gęstość pozorną masy rdzeniowej zagęszczonej przez wstrzeliwanie, z której zostały wycięte próbki walcowe w ilości n , służące do określania rozkładu gęstości lokalnej na szerokości rdzenia. Obliczenia wykonano na podstawie metody bilansowania wyników pomiarów masy uzyskanych z sondowania oraz pozostałości w rdzennicy:

$$\rho_{p\text{sr}} = [(m_{rdz}/(V_c - nV_{pr}) + (m_{pr}/nV_{pr})] \quad (34)$$

gdzie:

m_{rdz} - masa pozostałości masy rdzeniowej po wycięciu próbek, g

m_{pr} – sumaryczna masa próbek uzyskana w wyniku sondowania, g

n – liczba próbek,

W omawianych badaniach oznaczenia występujące we wzorze miały następujące wartości:

$V_c = 817,26\text{cm}^3$ – objętość geometryczna rdzennicy,

$V_{pr} = 31,4\text{cm}^3$ – objętość geometryczna pojedynczej próbki,

$nV_p = 157\text{cm}^3$ – objętość sumaryczna 5 próbek.

Metoda sondowania obrazuje gęstość pozorną, jako średnią z ilości pobranych, która ma reprezentować średnią wartość całego rdzenia. Można zauważyć, że im jest

większa ilość pobieranych próbek, tym wartość gęstości określona na tej podstawie jest bardziej zbliżona jest do wartości rzeczywistej osiągniętej przez podzielenie masy rdzenia przez objętość wnęki. Ta metoda, która bilansuje objętości i masę zawartą w komorze naboowej oraz po jej wstrzeleniu do rdzennicy pozwala określić średnią gęstość pozorną w całej objętości rdzenia niezależnie od rzeczywistego zagęszczenia w różnych miejscach rdzennicy.

Zrealizowane pomiary gęstości, wykazane stosowanymi metodami pozwalają ocenić stopień równomierności upakowania ziaren piasku we wnęcie technologicznej, co z punktu widzenia technologii przemysłowej jest miernikiem jakości wykonania rdzenia ocenianego przez jego wytrzymałość [50].

Etap drugi badań.

Badania przeprowadzono na nowej rdzennicy dokonując systemowej zmiany powierzchni odpowietrzeń wnęki przez grupowanie aktywnych lub zamkniętych otworów odpowietrzających zgodnie z poziomami zaznaczonym schematycznie na rys.30. Poziomy determinują poszczególne strefy odpowietrzenia oraz umożliwiają ocenę ich wpływu na proces wypełniania rdzennicy. Kolejność zamykania otworów odpowietrzających (i naturalnie pozostawienie odpowietrzalników aktywnych) była prowadzona wywołania w celu kierunkowego przepływu strumienia powietrzno-piaskowego i tym samym uzyskania wpływu na rozkład skuteczności zagęszczenia rdzenia. Szczegółowe warunki otwartych otworów odpowietrzających przedstawiono w tabeli 21. Natomiast w tabeli 22 dla przyjętych otworów strzałowych i zadanej kombinacji poziomów odpowietrzenia, zilustrowane dane dotyczące stopnia odpowietrzenia rdzennicy.

Tabela 21. Schemat użycia otworów odpowietrzających przy zastosowaniu poziomów ich usytuowania zilustrowanych na rys. 30.

Ciśnienie robocze [MPa]	Średnica otw. strzałowego [mm]		
	10	15	25
	„Poziomy” ułożenia otwartych otworów odpowietrzających		
0,3 0,4 0,5	IV	IV	IV
	I	I	I
	II+III + IV	II+III + IV	II+III + IV
	I+II + III	I+II + III	I+II + III

Tabela 22. Stopień odpowietrzenia rdzennicy według zastosowanych poziomów.

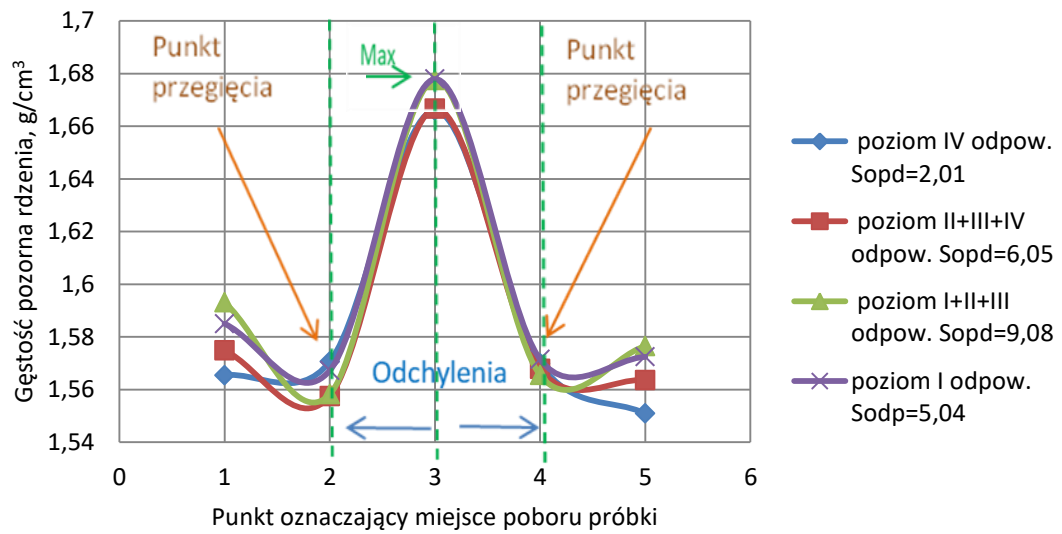
Średnica otworu strzałowego d [mm]	Stopień odpowietrzenia dla zadanych poziomów $S_{odp} = \sum f_{odp} / f_d$			
	IV	I	II+III+IV	I+II+III
10	2,02	5,05	6,06	9,09
15	0,90	2,24	2,69	4,04
25	0,32	0,81	0,97	1,45

Pobieranie próbek do określenia rozkładu gęstości masy rdzeniowej w rdzennicy wykonano zgodnie z rysunkiem 56. Obliczenie rozkładu gęstości dokonano metodą opisaną w punkcie 1 (pkt.12.1).

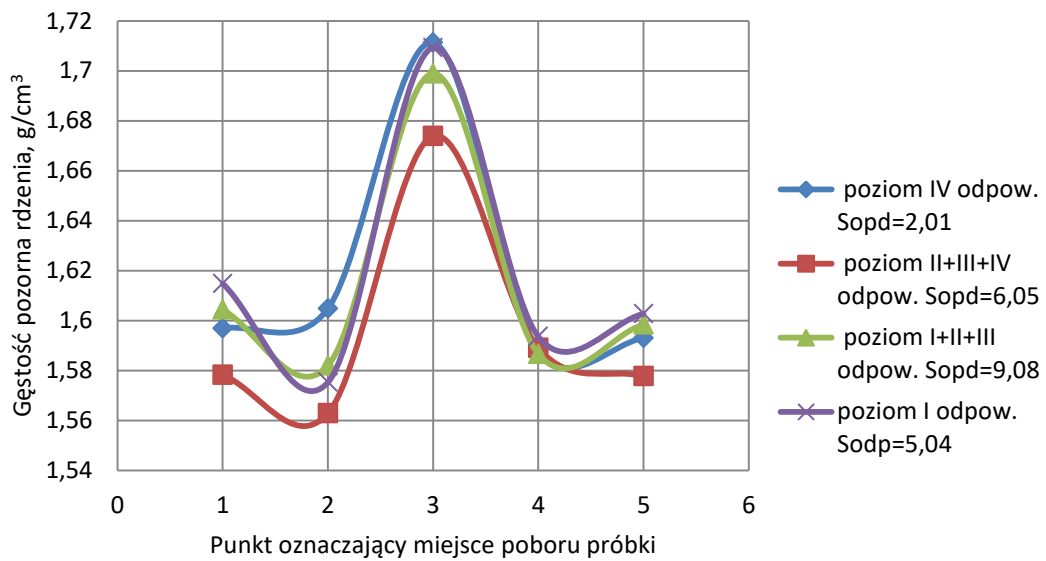
Z dotychczasowych badań rozkłady wartości średnich przedstawiono na wykresach słupkowych, które w formie graficznej i analitycznej ułatwiają jednoznaczne porównywanie wartości uzyskanych w różnych warunkach badawczych. Wzorując się na opracowaniach (Monografia R.Dańko [50] i pozycji J.Dańko [40]) posłużono się również odmienną metodą wykreślenia charakterystyk, według której można dokonać interpolacji przebiegu krzywych łączących wyniki rozkładu gęstości przypisanych do miejsc poboru próbek. Próbki charakteryzują przestrzeń w rdzennicy identyfikowaną przez miejsca poboru próbek.

Charakterystyki rozkładu gęstości pozornej opracowane według tej metody przedstawiono na rysunkach 61 – 63:

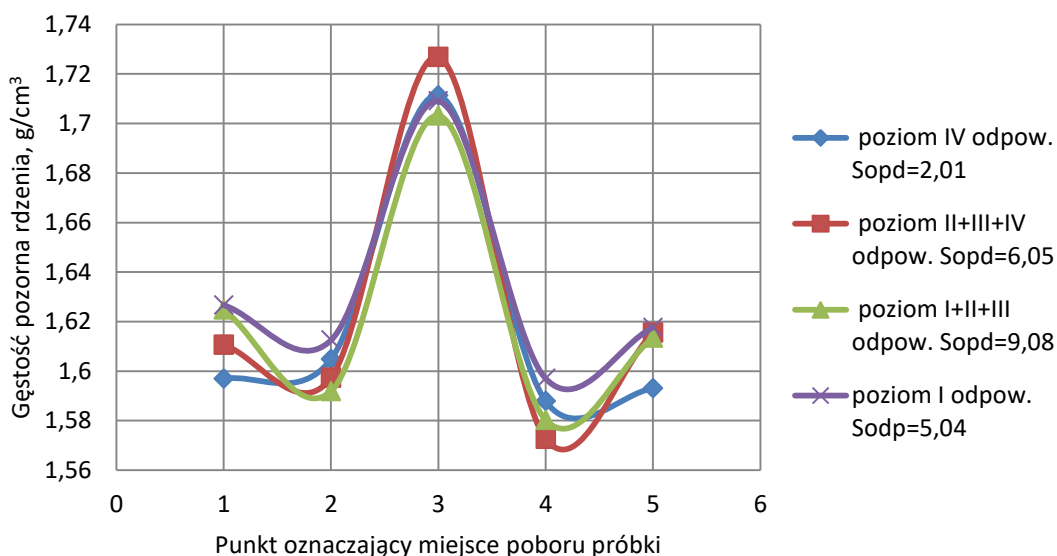
- ciśnienie zmieniane stopniowo 0,3; 0,4; 0,5MPa, otwór strzałowy d = 10mm z zastosowaniem poziomu odpowietrzenia zgodnie z tabelą 21 oraz rys.30.



Rys. 61. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=10\text{mm}$, $p = 0,3\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowiedzeń.



Rys. 62. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d = 10\text{mm}$, $p = 0,4\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowiedzeń.



Rys. 63. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d = 10\text{mm}$, $p = 0,5\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń.

Analogiczne badania dla otworów strzałowych $d = 15$ i 25mm ciśnienia wstrzeliwania wynoszącego $0,3 - 0,5\text{MPa}$ zawarto w Albumie Tabel i Danych Pomiarowych na końcu opracowania, jako Część 3. Kontynuacja zbioru charakterystyk dla ciśnienia $0,4$ i $0,5\text{MPa}$ z zastosowanymi otworami strzałowymi $d = 10 - 25\text{mm}$, na których krzywe reprezentują wartości stopnia odpowietrzenia dla poszczególnych oznaczeń Z1 do Z6 wg. schematu w tabeli 9.

Wartości średnie gęstości pozornej dla zadanych parametrów wstrzeliwania; średnica otworu strzałowego, nadciśnienie, stopień odpowietrzenia, uzyskano z badań zgodnie z założonymi parametrami procesowymi. Średnią wartość rozkładu gęstości pozornej z pobranych próbek masy rdzeniowej przedstawiono w tabeli 23.

Tabela 23. Tabela wartości średnich gęstości pozornych w odniesieniu do stopnia odpowietrzenia.

d=10mm, p = 0,3MPa						
„Poziom” odpowietrzenia	Numer próbki					$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
Poziom IV	1,565	1,571	1,666	1,570	1,551	1,585
Poziom II + III + IV	1,575	1,557	1,667	1,568	1,564	1,586
Poziom I + II + III	1,593	1,558	1,677	1,565	1,576	1,594
Poziom I	1,585	1,567	1,678	1,571	1,572	1,595
Wartość uśredniona						1,590

Tabela 23. Ciąg dalszy

d=10mm, p = 0,4MPa						
„Poziom” odpowietrzenia	Numer próbki					$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
Poziom IV	1,553	1,565	1,672	1,589	1,541	1,584
Poziom II + III + IV	1,578	1,563	1,674	1,589	1,578	1,596
Poziom I + II + III	1,604	1,582	1,699	1,587	1,598	1,614
Poziom I	1,615	1,575	1,709	1,594	1,603	1,619
Wartość uśredniona						1,603
d=10mm, p = 0,5MPa						
„Poziom” odpowietrzenia	Numer próbki					$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
Poziom IV	1,597	1,605	1,711	1,588	1,593	1,619
Poziom II + III + IV	1,611	1,597	1,727	1,573	1,616	1,625
Poziom I + II + III	1,625	1,592	1,703	1,580	1,614	1,623
Poziom I	1,627	1,612	1,709	1,597	1,618	1,633
Wartość uśredniona						1,625
d=15mm, p = 0,3MPa						
„Poziom” odpowietrzenia	Numer próbki					$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
Poziom IV	1,605	1,607	1,710	1,608	1,592	1,624
Poziom II + III + IV	1,631	1,615	1,715	1,606	1,626	1,639
Poziom I + II + III	1,627	1,589	1,706	1,605	1,620	1,629
Poziom I	1,626	1,600	1,710	1,597	1,619	1,631
Wartość uśredniona						1,631
d=15mm, p = 0,4MPa						
„Poziom” odpowietrzenia	Numer próbki					$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
Poziom IV	1,620	1,616	1,710	1,645	1,597	1,638
Poziom II + III + IV	1,626	1,617	1,714	1,611	1,610	1,636
Poziom I + II + III	1,633	1,599	1,710	1,597	1,626	1,633
Poziom I	1,623	1,594	1,724	1,610	1,619	1,634
Wartość uśredniona						1,635
d=15mm, p = 0,5MPa						
„Poziom” odpowietrzenia	Numer próbki					$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
Poziom IV	1,623	1,621	1,718	1,622	1,606	1,638
Poziom II + III + IV	1,635	1,626	1,726	1,604	1,624	1,643
Poziom I + II + III	1,649	1,598	1,725	1,605	1,628	1,641
Poziom I	1,604	1,720	1,602	1,628	1,620	1,635
Wartość uśredniona						1,639

Tabela 23. Ciąg dalszy

d=25mm, p = 0,3MPa						
„Poziom” odpowietrzenia	Numer próbki					$\rho_{\text{śr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
Poziom IV	1,650	1,640	1,740	1,621	1,640	1,658
Poziom II + III + IV	1,640	1,629	1,726	1,621	1,634	1,650
Poziom I + II + III	1,635	1,610	1,733	1,619	1,629	1,645
Poziom I	1,633	1,724	1,725	1,625	1,643	1,670
Wartość uśredniona						1,656
d=25mm, p = 0,4MPa						
„Poziom” odpowietrzenia	Numer próbki					$\rho_{\text{śr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
Poziom IV	1,655	1,633	1,732	1,637	1,648	1,661
Poziom II + III + IV	1,655	1,626	1,736	1,633	1,650	1,660
Poziom I + II + III	1,650	1,603	1,730	1,630	1,658	1,654
Poziom I	1,650	1,634	1,753	1,639	1,651	1,665
Wartość uśredniona						1,660
d=25mm, p = 0,5MPa						
„Poziom” odpowietrzenia	Numer próbki					$\rho_{\text{śr}} [\text{g/cm}^3]$
	1	2	3	4	5	
Poziom IV	1,660	1,635	1,756	1,654	1,662	1,673
Poziom II + III + IV	1,669	1,638	1,756	1,666	1,675	1,681
Poziom I + II + III	1,659	1,630	1,761	1,643	1,657	1,670
Poziom I	1,659	1,632	1,753	1,621	1,650	1,663
Wartość uśredniona						1672

Gęstość pozorna jest parametrem, który w technologii wykonania rdzeni, a także form odlewniczych przyjmowany jest za kryterium stopnia zagęszczenia masy i tym samym stanowi, o jakości wykonania rdzenia. Jakość wykonanego rdzenia wskazuje na skuteczność procesu, stopień zagęszczenia masy i zakładanego odtworzenia kształtu rdzenia zgodnie z konstrukcją rdzennicy. Rozkłady gęstości pozornej w funkcji średnicy otworu strzałowego na przyjętych poziomach ułożenia otworów otwartych i zamkniętych przedstawione na załączonych rysunkach 61-69 kształtują się według podobnej krzywej, zbliżonej do krzywej Gaussa.

Największa wartość gęstości we wszystkich przypadkach występuje w osi otworu strzałowego (punkt 3 poboru próbki) i wynosi:

- 1,60 - 1,72 g/cm^3 , otwór strzałowy $d = 10\text{mm}$,
- 1,67 - 1,75 g/cm^3 , otwór strzałowy $d = 15\text{mm}$,
- 1,72 - 1,76 g/cm^3 , otwór strzałowy $d = 25\text{mm}$,

Charakterystyki gęstości pozornej mają dwa przegięcia i są umiejscowione symetrycznie w punktach poboru 2 i 4 w stosunku do otworu strzałowego (np. charakterystyka na rysunku 61). Mechanizm rozpływu masy w strzelarkach z głowicą jednootworową został opisanych w monografii przez R.Dańko [50].

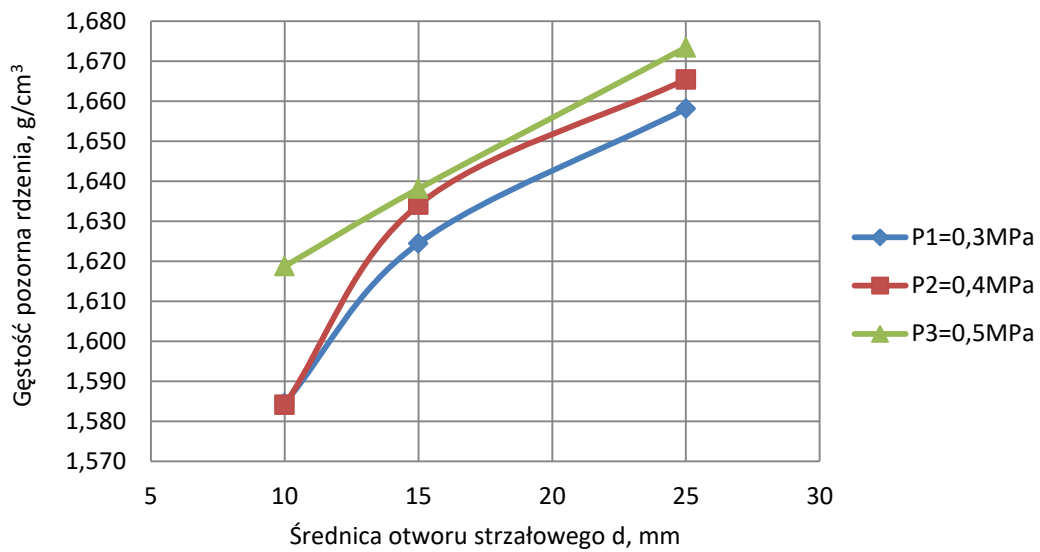
Wartości gęstości pozornej w poszczególnych punktach wskazują na rozproszenie od wartości maksymalnej. Technologicznie gęstość pozorna pomiędzy punktami przegięcia wskazuje, że stopień zagęszczenia będzie się przekładał na dokładność odtworzenia rdzenia. W wymienionych punktach przegięcia 1, 2 oraz 4, 5 występuje obniżenie gęstości pozornej, co oznacza, że w tych miejscach kinetyka płynięcia strumienia piaskowo-powietrznego jest zaburzona.

Pozostałe charakterystyki (rys.61-69) należy analizować według dokonanego opisu na przykładzie rysunku 61.

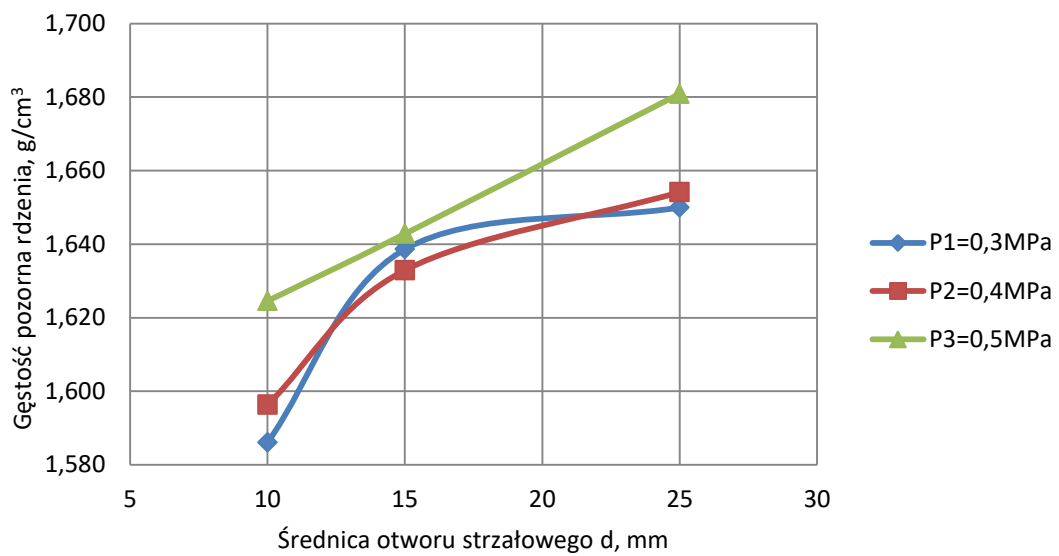
Docelowo w formułowaniu warunków przebiegu procesu zagęszczania i konstruowania przestrzeni technologicznej (rdzennicy) należy dążyć, aby ostateczny kształt rozkładu gęstości był równomierny we wszystkich punktach od 1 do 5. Kształt charakterystyk będzie zmierzał do tak zwanego ‘wypłaszczenia’.

Ze względów technologicznych na podstawie wyników można typować najbardziej korzystne parametry (średnicę otworu strzałowego i poziom otworów odpowietrzających). Wynika z tego, że korzystne warunki występują przy średnicy otworu strzałowego 15mm, ciśnieniu 0,5MPa i ilości otwartych otworów odpowietrzających zgrupowanych na poziomie II+III+IV.

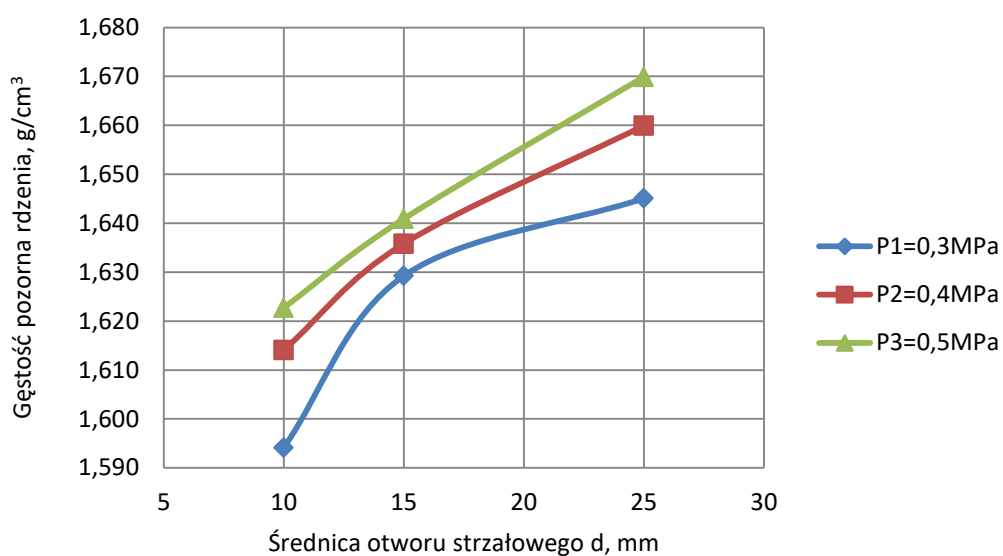
Niezależnie od przedstawionego zbioru charakterystyk i ich analizy, na podstawie zgromadzonych wyników (tabela 23), wykonano charakterystyki rozkładu gęstości pozornej w funkcji trzech otworów strzałowych 10, 15, 25 mm i zadawanego ciśnienia 0,3; 0,4; 0,5MPa. Zbiór charakterystyk do wymienionych warunków przedstawiono na rysunkach 70 do 77.



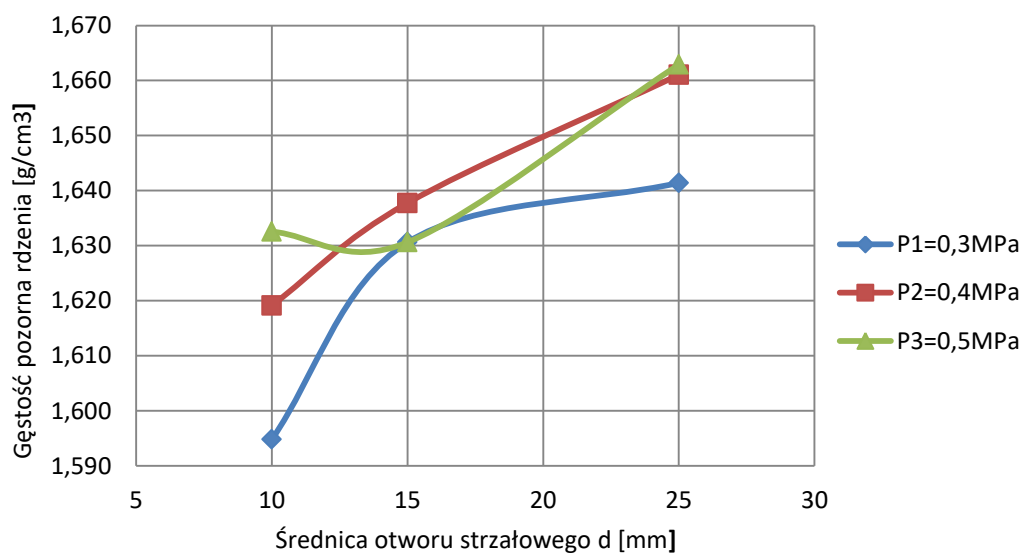
Rys. 70. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji otworu strzałowego, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju 158,7 mm².



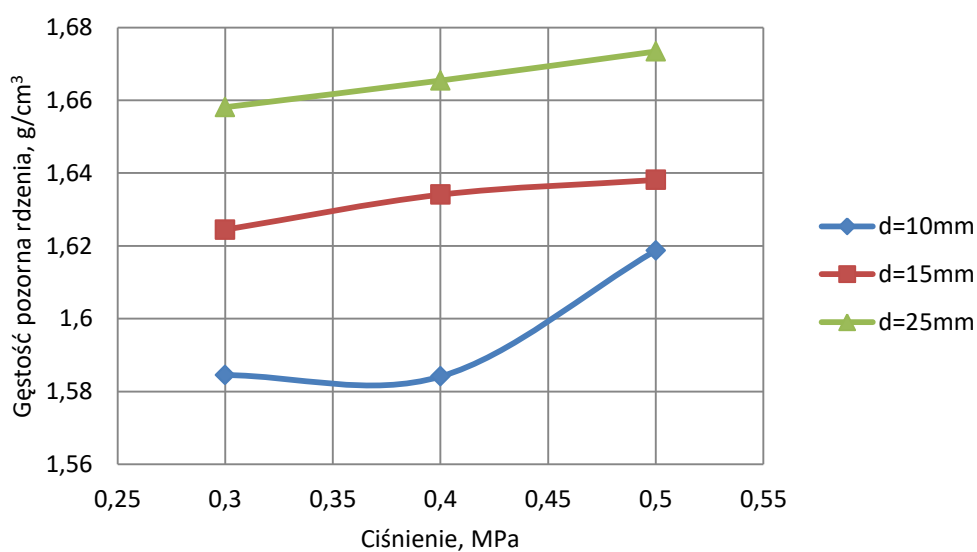
Rys. 71. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji otworu strzałowego, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie II+III+IV o łącznym przekroju 476,1 mm².



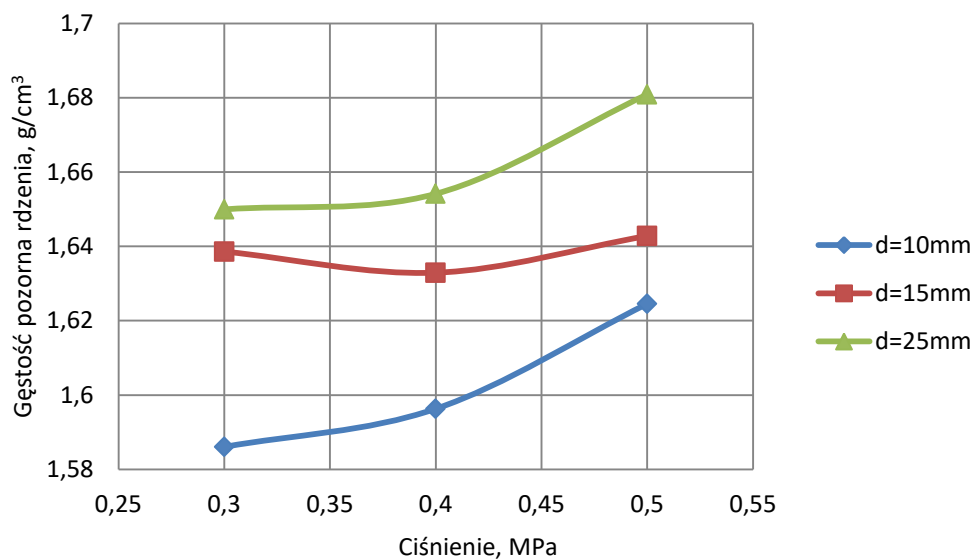
Rys. 72. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji otworu strzałowego, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I+II+III o łącznym przekroju 714,1mm².



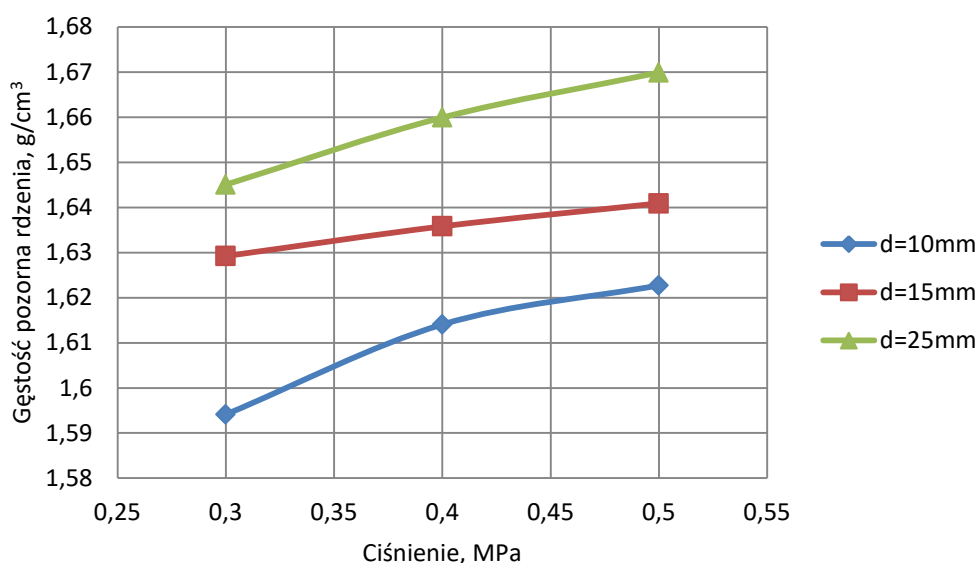
Rys. 73. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji otworu strzałowego, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I o łącznym przekroju 396,7mm².



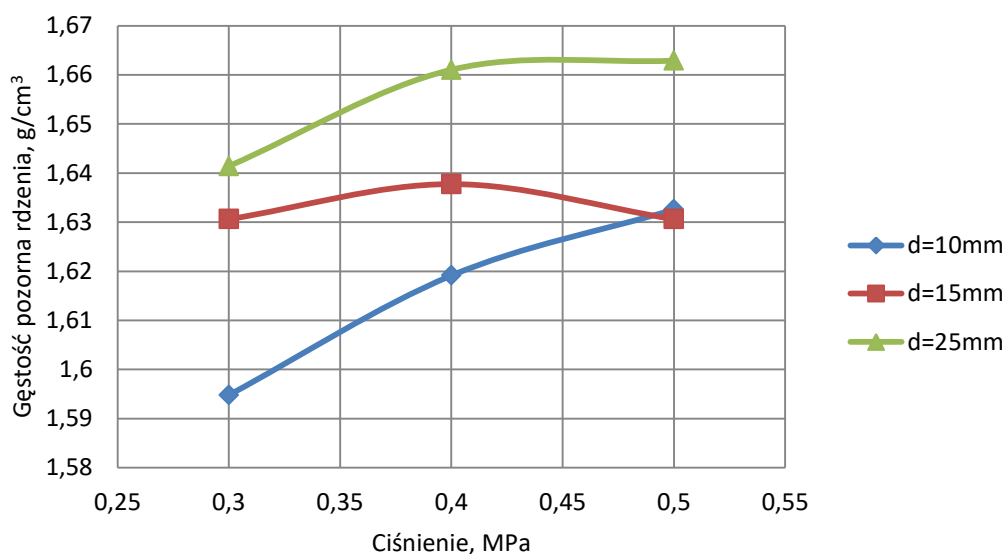
Rys. 74. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji ciśnienia otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$



Rys. 75. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji ciśnienia, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie II+III+IV o łącznym przekroju $476,1\text{mm}^2$.



Rys. 76. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji ciśnienia, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I+II+III o łącznym przekroju 714,1mm²



Rys. 77. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji ciśnienia, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I o łącznym przekroju 396,7mm².

Na podstawie analizy załączanych charakterystyk stwierdza się zmianę gęstości pozornej w kierunku wzrastającym zależnym od zwiększanej średnicy otworu strzałowego i podnoszonego ciśnienia.

Zestawienie wyników pomiaru gęstości pozornej masy (tabela 24) w procesie nadciśnieniowego zagęszczania wstrzeliwaniem masy z żywicą Carbophen do

rdzennicy doświadczalnej o różnym systemie otwartych odpowietrzeń, zróżnicowanej wartości ciśnienia i średnicy otworów strzałowych.

Zawarte w tabeli dane potwierdzają najbardziej korzystny system odpowietrzenia oznaczony, jako poziom I, dla którego są uzyskiwane największe wartości średniej gęstości pozornej, niezależnie od tego, że występuje widoczna anizotropia rozkładu gęstości lokalne w osi otworu strzałowego oraz w symetrycznie rozmieszczonych względem osi punktach pomiaru 1 i 3 oraz 2 i 4. Najmniejsze wartości gęstości z reguły występują w punktach 2 i 4 podczas gdy w punktach 1 i 5 pojawiają się zwiększone wartości świadczące o korzystnym wpływie otwartych odpowietrzeń w bocznych ścianach wnęki rdzennicy. Generalnie można zauważyć korzystny wpływ zwiększonego ciśnienia wstrzeliwania i średnicy otworów strzałowych na osiąganą wartość gęstości pozornej.

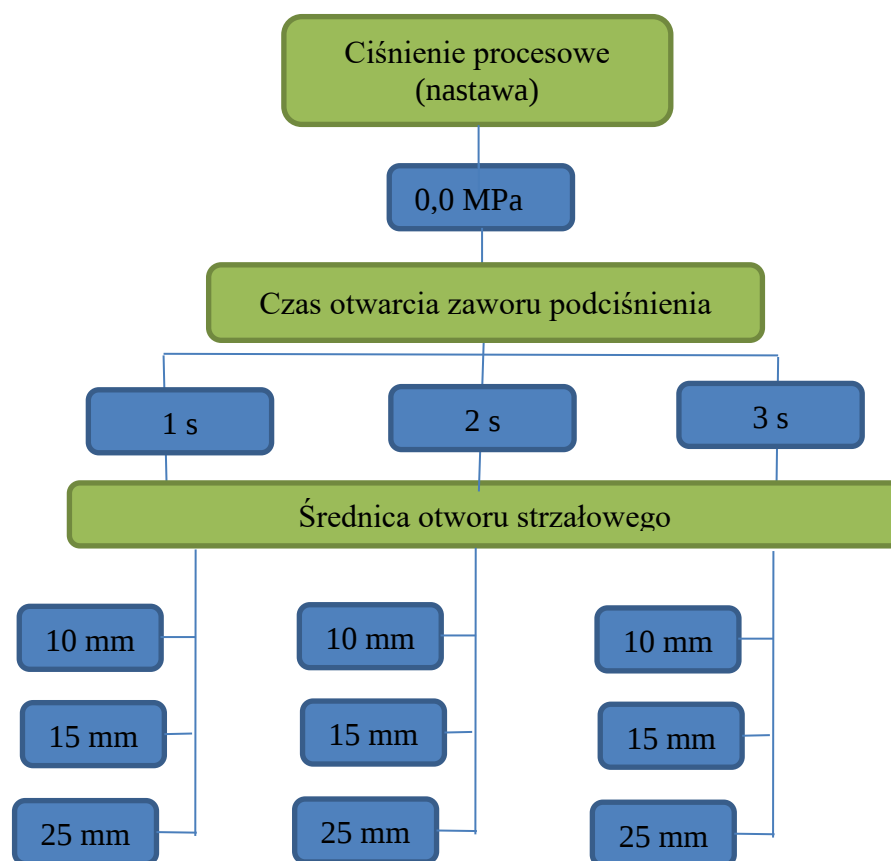
Tabela 24. Gęstość pozorna masy w funkcji otworu strzałowego, ciśnienia i stopnia odpowietrzenia.

Oznaczenie poziomu wg rys. 30 i tabeli 21 otwartych odpowietrzeń rdzennicy; $S_{odp} = \Sigma F_{odp} / F_d$	Gęstość pozorna masy [g/cm ³], średnica otworu strzałowego d [mm], ciśnienie strzału p [MPa]								
	10 mm ($F_d = 78,54 \text{ mm}^2$)			15 mm ($F_d = 176,71 \text{ mm}^2$)			25 mm ($F_d = 490,87 \text{ mm}^2$)		
	0,3 [MPa]	0,4 [MPa]	0,5 [MPa]	0,3 [MPa]	0,4 [MPa]	0,5 [MPa]	0,3 [MPa]	0,4 [MPa]	0,5 [MPa]
IV; $F_{odp} = 158,7 \text{ mm}^2$	1,585	1,584	1,619	1,624	1,638	1,638	1,658	1,661	1,673
II+III+IV; $F_{odp} = 476,1 \text{ mm}^2$	1,586	1,596	1,625	1,639	1,636	1,643	1,650	1,660	1,681
I+II+III; $F_{odp} = 714,1 \text{ mm}^2$	1,594	1,614	1,623	1,629	1,633	1,641	1,645	1,654	1,670
I; $F_{odp} = 396,7 \text{ mm}^2$	1,595	1,619	1,633	1,631	1,634	1,635	1,670	1,665	1,663

12.2. Program i wyniki badań procesu z podciśnieniem

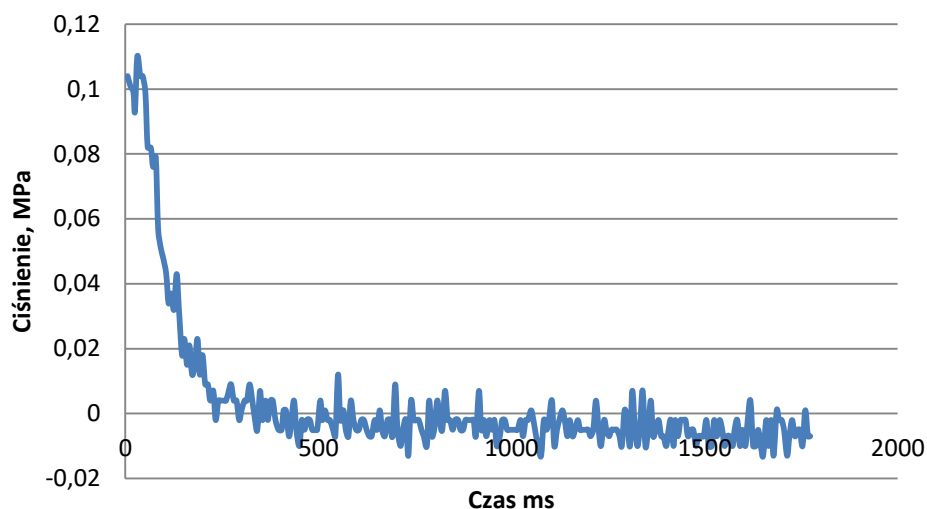
Program badań technologicznych z podciśnieniem zrealizowany został zgodnie z założeniami podanymi na rysunku 78. Wytworzenie próżni oznacza osiągnięcie stanu ciśnienia znaczenie poniżej ciśnienia atmosferycznego. Rozróżnia się próżnie niską, średnią, wysoką i bardzo wysoką, przy czym ta ostatnia jest uzyskiwana za pomocą środków fizykochemicznych (pochłaniaczy polepszających próżnię). W zależności od rodzaju pompy istnieje możliwość uzyskania ciśnienia rzędu od 10^{-2} do 10^{-6} Tr. Jeden tor to ciśnienie jednego mm słupa rtęci przy temperaturze 0°C . Wartość jednego tora odpowiada ciśnieniu 0,00136 atm. Zastosowana pompa do badań według producenta wykazywała sprawność 99,987 % o możliwości uzyskania próżni 10^{-2} Tr. Po przeliczeniu wartość w jednostkach ciśnienia wynosi $0,00136 \cdot 10^{-2}$ atm.

W postępowaniu badawczym uzyskanie próżni po włączeniu pompy próżniowej, polegało na kontrolowaniu zmiany narastania podciśnienia w funkcji czasu pracy pompy, do momentu osiągnięcia próżni określonej w metodyce badawczej, jako moment rozpoczęcia procesu dmuchowego. Ze względu na dynamikę procesu parametrem mającym istotny wpływ, jest czas przepływu strumienia powietrznego liczony od momentu otwarcia do zamknięcia zaworu pneumatycznego. Do pomiaru zastosowano manometr cieczowy wzorcowany (wakumetr glicerynowy, próżniomierz) z podziałką -0,1 do 0,0MPa. Ze względu na charakter fizyczny i możliwości osiągnięcia próżni przyjęto wartość na poziomie 0,0MPa (rzeczywista wartość wynosi $0,136 \cdot 10^{-4}$ MPa), jako pozycję odniesienia do interpretacji wykresów. Jest to wartość maksymalna ze względu na zastosowany typ pompy próżniowej.



Rys. 78. Parametry procesowe w badaniach podciśnienia o wartości rzeczywistej $0,136 \cdot 10^{-4}$ MPa (opracowanie własne).

Podobnie jak w procesie z nadciśnieniem dokonano sprawdzenia szczelności połączeń w instalacji podciśnieniowej w układzie: rdzennica, połączenia rurowe, zawór podciśnieniowy, zbiornik podciśnienia, pompa próżniowa. Próbę osiągnięcia podciśnienia i szczelności wykonano poprzez pomiar spadku ciśnienia w określonym czasie. Stosowną charakterystykę ciśnienia w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 79.



Rys. 79. Przebieg ciśnienia w rdzennicy przy podciśnieniu roboczym $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 2s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I+II+III+IV o łącznym przekroju $872,8\text{mm}^2$ w połączeniu z instalacją do zaworu podciśnieniowego.

Testowany układ spełnia wymogi szczelności, co wskazuje narastanie podciśnienia od wartości $0,1\text{M Pa}$ do $0,0\text{MPa}$ w określonym długim czasie pracy pompy próżniowej i utrzymaniu się ciśnienia na stałym poziomie. Po wyłączeniu pompy próżniowej i zamknięciu zaworu podciśnieniowego nie zaobserwowano zmian ciśnienia.

1) Badania z zastosowaniem rdzennicy klasycznej (bez przegród)

Zastosowanie rdzennicy prostopadłościennej bez przegród dało możliwość określenia wpływu podciśnienia na wypełnienie komory o określonej objętości w układzie poziomym, do której wstrzeliwana masa rozpływała się koncentrycznie od osi otworu strzałowego.

Na przykładowych fotogramach (rys. 80, 81) uwidocznione jest wypełnienie rdzennicy w zależności od zastosowanego otworu strzałowego i czasu otwarcia zaworu podciśnienia. Charakterystyczny jest brak wypełnienia w górnej części w osi otworu strzałowego i powstałej wnęki częściowo w postaci leja, a częściowo spłaszczonej szczeliny, które są zdecydowanie wynikiem oporów przepływu masy

z komory nabojoyej przez przewężenie, które w tym przypadku stanowi otwór strzałowy. W zależności od przekroju otworu strzałowego, którego funkcja jest w tym przypadku całkowicie inna niż w procesie nadciśnieniowym, ulega także zmianie wydajność wypływu masy, co przekłada się na skuteczność wypełnienia komory

rdzennicy przy relatywnie niskim poziomie ssących sił wymuszenia wynikających z różnicy ciśnienia w rdzennicy i nad masą w komorze nabojoyej. Z punktu widzenia wykorzystania podciśnienia do zapełnienia wnęki rdzennicy masą i nadania jej wstępnego zagęszczenia ten układ jest praktycznie mało przydatny pod względem technologicznym i energetycznym. Nie zapewnia, bowiem równomiernego rozkładu masy we wnęce technologicznej zarówno pod względem objętościowym ani pod względem stworzenia dobrych warunków do równomiernego dozowania masy do wnęki w celu lepszego wykorzystania istniejącego gradientu ciśnienia. W tym przypadku niekorzystny wpływ ma także zaobserwowane samoczynne wysypywanie się masy z otworów strzałowych o większych średnicach od 10 i 15 mm, co również jest przyczyną większego skupienia masy rdzeniowej pod otworem wypływowym, będącej skondensowaną formą strumienia dwufazowego mniej podatną na przemieszczanie się wraz z przepływającym strumieniem powietrza i stanowiącego przeszkodę. Wyniki wskazują, że największy współczynnik zapełnialności rdzennicy osiągnięto przy czasie 3 s.

Metodę obliczania *współczynnika zapełnialności rdzennicy* K_{zr} podaje zależność określona wzorem [14, 15, 16, 27]:

$$K_{zr} = \frac{M_{rdz}}{M_{st}} \cdot 100\% = \frac{\rho_m}{\rho_{st}} \cdot 100\% \quad (35)$$

gdzie:

M_{rdz} - masa rdzenia uzyskanego w danych warunkach, g,

ρ_m - średnia gęstość masy rdzeniowej zagęszczonej przez wstrzelenie, g/cm³,

V_c - objętość rdzenia, m³ (817,26 cm³),

$M_{st} = V_c \rho_{st}$ - umowna masa rdzenia, kg/m³ (1,389 g/cm³),

ρ_{st} - gęstość pozorna masy uzyskana w próbce walcowej przy trzykrotnym ubiciu znormalizowanym ubijakiem (1,72 g/cm³).



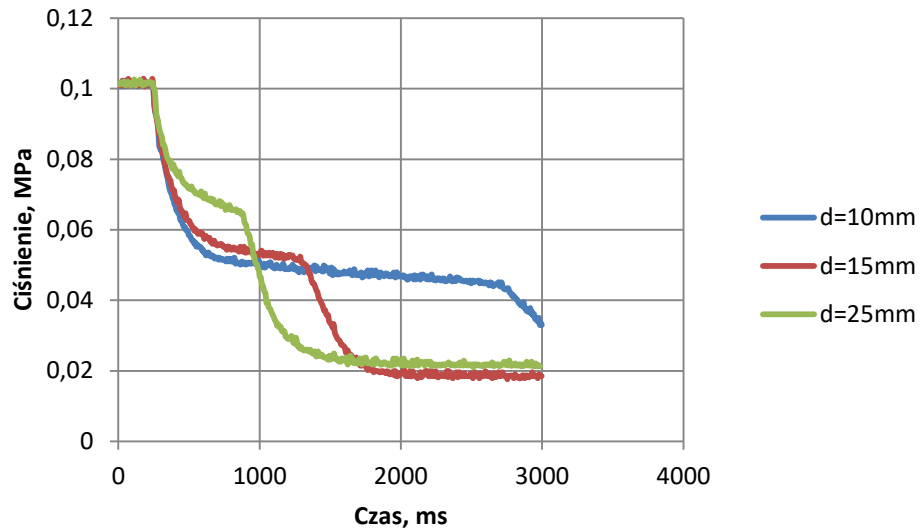
Rys. 80. Fotogram wypełnienia rdzennicy: średnica otworu strzałowego łączącego komorę nabojową z rdzennicą $d = 15\text{mm}$, podciśnienie $0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu $t = 3\text{s}$, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 4,94$, stopień zapełnialności $K_{\text{zr}} = 67\%$.



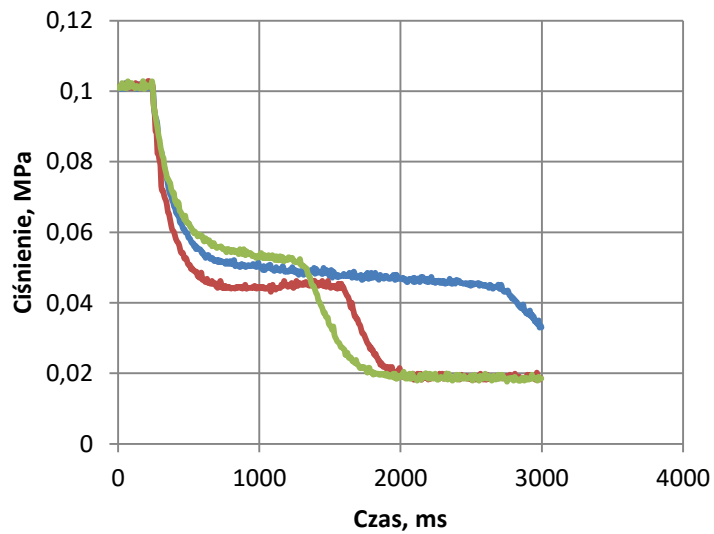
Rys. 81. Fotogram wypełnienia rdzennicy: średnica otworu strzałowego $d = 25\text{mm}$, podciśnienie $0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu $t = 3\text{s}$, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 1,78$, stopień zapełnialności $K_{\text{zr}} = 74\%$.

W zależności od otworu strzałowego zmienna jest prędkość wypływu masy, co przekłada się na skuteczność zapełnienia komory rdzennicy. Potwierdzeniem zachodzących zmian są charakterystyki podane na rysunkach 82 i 83. Na wykresach widoczny jest uskoki na poziomie ciśnienia $0,05\text{MPa}$ i w przedziale czasu $800 - 1500\text{ms}$. Uskoki te są zróżnicowane zależne od średnic otworów strzałowych i stopnia odpowietrzenia. Na rysunku 82 stopień odpowietrzenia wynosi **4,94**, natomiast na rysunku 83 wynosi **1,78**.

Zaobserwowano również samoczynne wysypywanie się masy z otworu strzałowego o średnicy 25mm , co również było przyczyną nierówności zapełnienia komory. Zjawisko samoczynnego wysypywania się masy nie wystąpiło przy średnicach 10 i 15mm . Stosując średnicę otworu strzałowego 10 i 15mm , nadal eksperymentowano przy nastawie czasu $1, 2, 3\text{s}$. Wyniki wskazują, że największy współczynnik zapełnialności rdzennicy osiągnięto przy czasie 3s .



Rys. 82. Przebieg ciśnienia w rdzennicy przy włączonym systemie odciągania powietrza. Czas otwarcia podciśnienia 3 s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$. Nastawa pompy $p = 0,0\text{MPa}$.



Rys. 83. Przebieg ciśnienia w rdzennicy przy włączonym systemie odciągania powietrza. Czas otwarcia podciśnienia 3s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju $317,4\text{mm}^2$. Nastawa pompy $p = 0,0\text{MPa}$.

Metodę obliczania współczynnika zapełnialności rdzennicy K_{zr} podaje zależność określona wzorem [14, 15, 16, 27]:

$$K_{\text{zr}} = \frac{M_{\text{rdz}}}{M_{\text{st}}} \cdot 100\% = \frac{\rho_{\text{m}}}{\rho_{\text{st}}} \cdot 100\% \quad (36)$$

gdzie:

M_{rdz} - masa rdzenia uzyskanego w danych warunkach, g,

ρ_m - średnia gęstość masy rdzeniowej zagęszczonej przez wstrzelenie, g/cm³,

V_c - objętość rdzenia, cm³,

$M_{st} = V_c \rho_{st}$ - umowna masa rdzenia, g/cm³,

ρ_{st} - gęstość pozorna masy uzyskana w próbce walcowej przy trzykrotnym ubiciu znormalizowanym ubijakiem, g/cm³.

Zestawienie współczynników zapętnialności rdzennicy dla zadanych parametrów przedstawiono w tabeli 25. Parametry uporządkowano pod względem średnicy otworu strzałowego (10, 15, 25mm) i czasu otwarcia zaworu podciśnienia (1, 2, 3s). Na każdym etapie badania stopień odpowietrzenia wynosił 11,11, który wynika z sumarycznego przekroju otworów odpowietrzających zlokalizowanych na poziomach I+II+III+IV i wynosi 872,8mm².

Tabela 25. Zestawienie współczynników zapętnialności rdzennicy w funkcji średnicy zaworu strzałowego i czasu otwarcia zaworu podciśnienia.

Otwór strzałowy 10 mm, p = 0,0 MPa			
Poziom odpowietrzenia rdzennicy	Czas otwarcia zaworu podciśnienia		
	1s	2s	3s
I+II+III+IV, $S_{odp}=11,11$	$K_{zr}=15\%$	$K_{zr}=27\%$	$K_{zr}=42\%$
Otwór strzałowy 15 mm, p = 0,0 MPa			
Poziom odpowietrzenia rdzennicy	Czas otwarcia zaworu podciśnienia		
	1s	2s	3s
I+II+III+IV, $S_{odp}=4,94$	$K_{zr}=41\%$	$K_{zr}=53\%$	$K_{zr}=67\%$
Otwór strzałowy 25 mm, p = 0,0 MPa			
Poziom odpowietrzenia rdzennicy	Czas otwarcia zaworu podciśnienia		
	1s	2s	3s
I+II+III+IV, $S_{odp}=1,78$	$K_{zr}=49\%$	$K_{zr}=60\%$	$K_{zr}=74\%$

Analiza danych zapełniania wnęki w wyniku odciągania z niej powietrza do układu niskociśnieniowego stwarza możliwość w ciągu 3s. uzyskanie zapełnienia około 50% objętości wnęki formy pod warunkiem usytuowania otworów odpowietrzających stwarzających korzystny układ gradientu ciśnienia we wnęce rdzennicy. Przyjęty układ wnęki rdzennicy jest w tym przypadku taki sam jak dla zapełniania w procesie nadcisnieniowym stąd podobny jest rozkład gęstości masy we wnęce pomimo znacznie mniejszych wartości.

2) Badania z zastosowaniem rdzennicy klasycznej z przegrodami

Przegrody podzieliły przestrzeń technologiczną na trzy sektory (rys.84). W ten sposób stworzono warunki pobierania próbek do wyznaczenia rozkładu gęstości pozornej w sektorach położonych na lewo i prawo w stosunku do strefy centralnej.

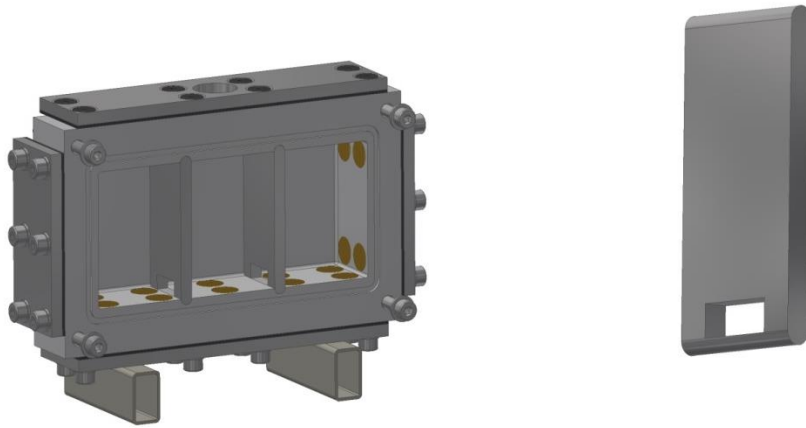
Objętości poszczególnych sektorów wynosiły:

- Sektor 1 (lewy) - $250,57\text{cm}^3$, (30,7% efektywnej objętości sektora rdzennicy trójwnękowej),
- Sektor 2 (centralny) - $250,57\text{cm}^3$, (30,7% efektywnej objętości sektora rdzennicy trójwnękowej),
- Sektor 3 (prawy) - $250,57\text{cm}^3$, (30,7% efektywnej objętości sektora rdzennicy trójwnękowej).

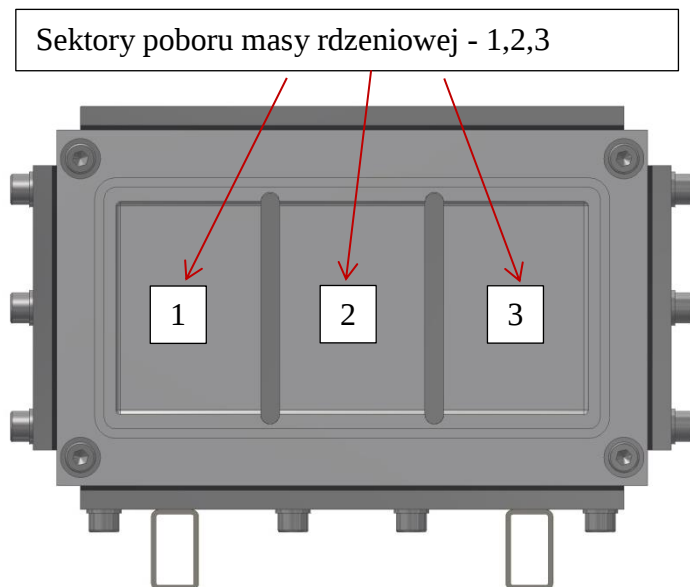
Pojemność badawcza rdzennicy po odjęciu części luźnych (przegród) zmniejszyła się w stosunku do pojemności komory rdzennicy bez przegród i wynosi $751,72\text{cm}^3$, co stanowi 92,12 % objętości nominalnej. Do wyznaczenia miejsc otworów odpowietrzających wzorowano się na literaturze [50, strona 197 tabela V.11]. Cytowaną tabelę przedstawiono w pracy pod numerem tabela 26, w której kolorem zielonym odznaczono interesującą pozycję.

Tabela 26. Charakterystyka wnęk rdzennic doświadczalnych i systemów ich odpowietrzenia stosowanych w badaniach wpływu strefy odpowietrzeń czynnych na zapełnianie rdzenni [50].

Lp.	Charakterystyka wnęki rdzennicy	Oznaczenie opcji stref odpowietrzenia, ilości i powierzchni czynnych odpowietrzeń w rdzennicy		
		Wszystkie [cm ²]	Górne [cm ²]	Dolne [cm ²]
2.	Rdzennica R-2. Wkładki z wycięciem dolnym "D" 2,5 cm ² , rys. 5.39a	R-2/O1/ D2,5	R-2/O2/ D2,5	R-2/O3/ D2,5



Rys. 84. Poglądowa konstrukcja rdzennicy i przegroda z otworem dolnym o przełocie 2,5 cm².



Rys. 85. Schemat podziału rdzennicy na sektory poboru próbek.

W celu ułatwienia sposobu pobrania próbek masy z rdzennicy niezagęszczonej (rys. 84, 85) do określenia gęstości pozornej masy metodą sondowania zastosowano metodę wagową. W metodzie tej uwzględniono:

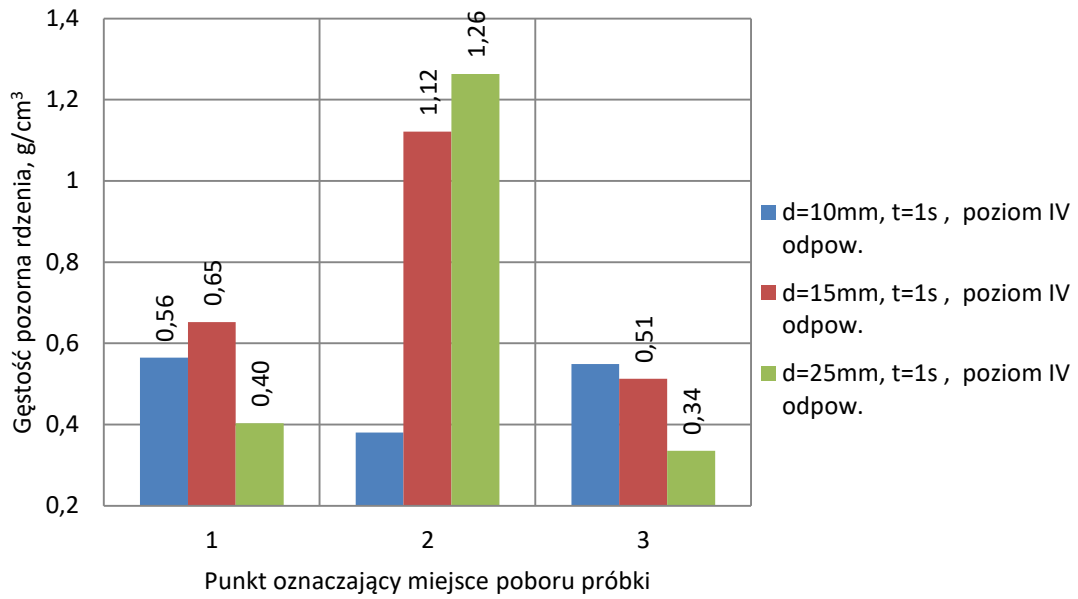
- ilość wstrzelonej masy rdzeniowej do rdzennicy obliczonej z bilansu wagowego masy zadanej do komory strzałowej i pozostałej w komorze po strzale,
- gęstość pozorną w sektorach mierzoną metodą grawimetryczną z uwzględnieniem objętości wypełnionego masą sektora rdzennicy,
- rozkład gęstości masy rdzeniowej w poszczególnych sektorach objętości $250,57 \text{ cm}^3$ był określany indywidualnie na podstawie uzyskanych pomiarów masy pojedynczego sektora.

W procesie podciśnieniowym, ze względu na odmienną dynamikę transportu masy, gęstość pozorna zagęszczania jest zależna od przepuszczalności. Im większa przepuszczalność tym proces wolniejszy w przeciwieństwie do procesu z nadciśnieniem. Proces jest dwu etapowy: w pierwszym etapie masa jest zasysana do przestrzeni technologicznej, a w drugim następuje ostateczne porządkowanie ułożenia ziaren (kierunkowanie w stronę otworów odpowietrzających) w całej objętości.

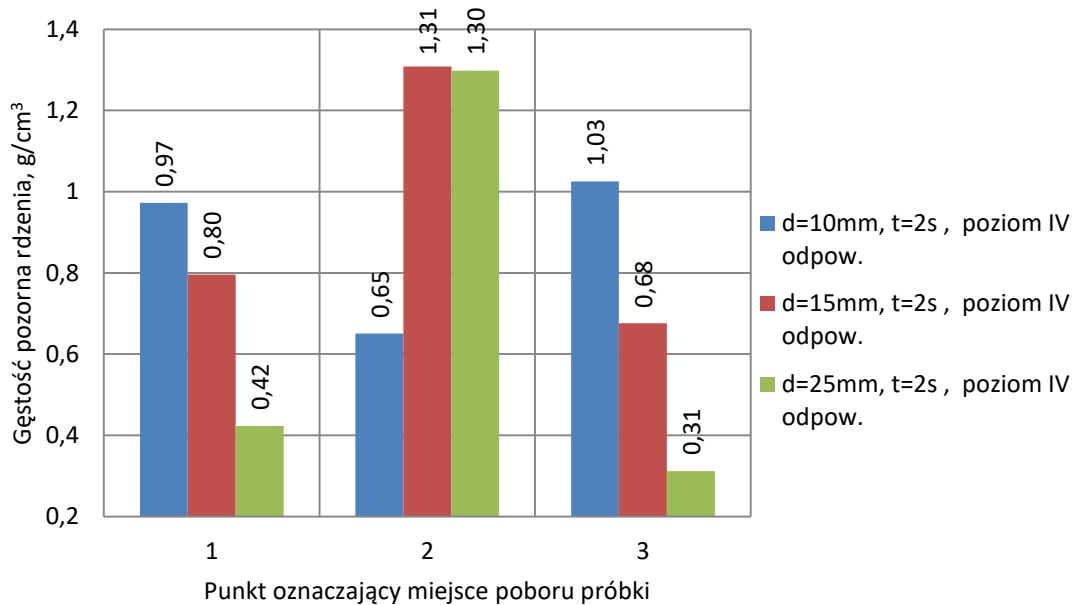
Badania przeprowadzono przy zadanych warunkach brzegowych:

- podciśnienie stałe: $0,00136 \cdot 10^{-2} \text{ atm}$ osiągnę w układzie pompa, zbiornik, zawór. Ze względu na charakter fizyczny i możliwości osiągnięcia próżni przyjęto wartość na poziomie $0,0 \text{ MPa}$,
- otwory strzałowe: $d = 10, 15, 25 \text{ mm}$,
- czas otwarcia zaworu podciśnieniowego: $t = 1, 2, 3 \text{ s}$,
- poziomy otwarcia otworów odpowietrzających: III+IV ($158,7 \text{ mm}^2$), IV ($317,4 \text{ mm}^2$).

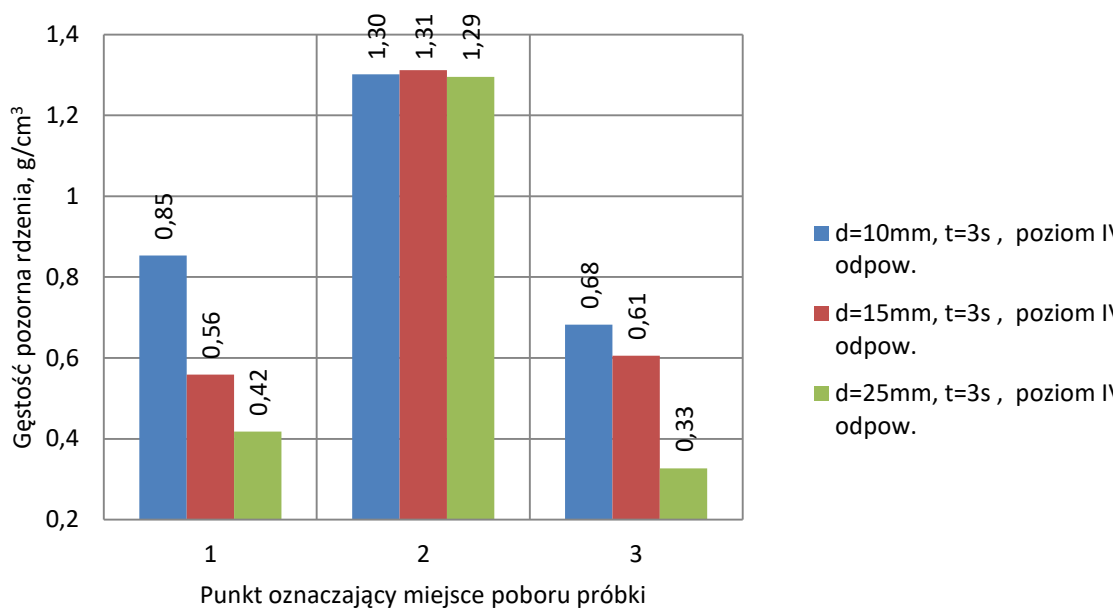
Wyniki z przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunkach 86 do 91.



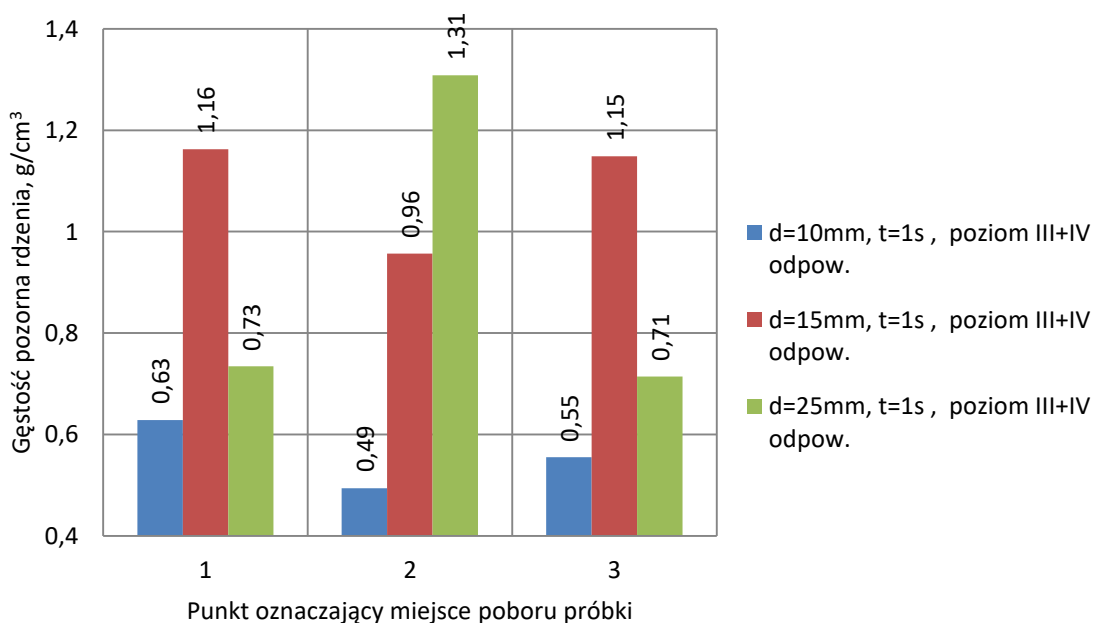
Rys. 86. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 1s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$.



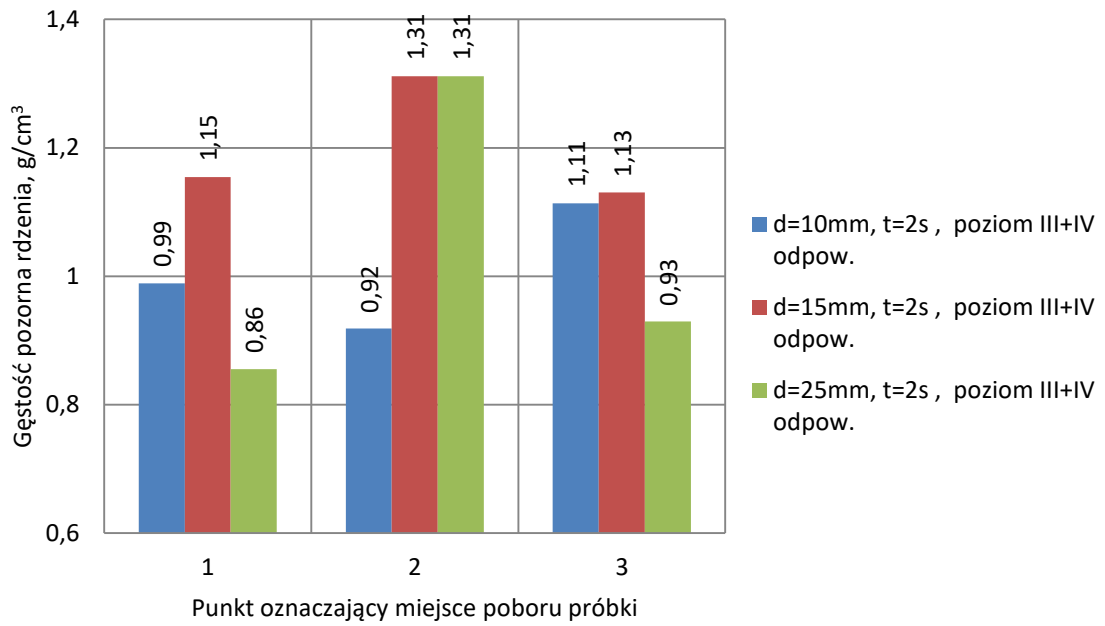
Rys. 87. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 2s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$.



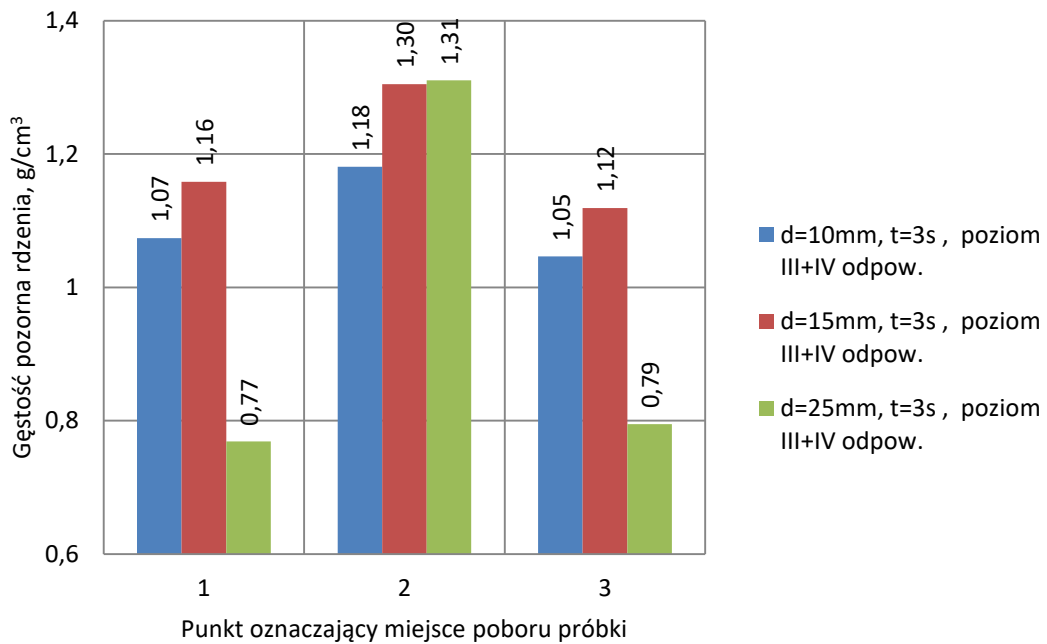
Rys. 88. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 3s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$.



Rys. 89. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 1s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju $317,4\text{mm}^2$.



Rys. 90. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 2s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju $317,4\text{ mm}^2$.

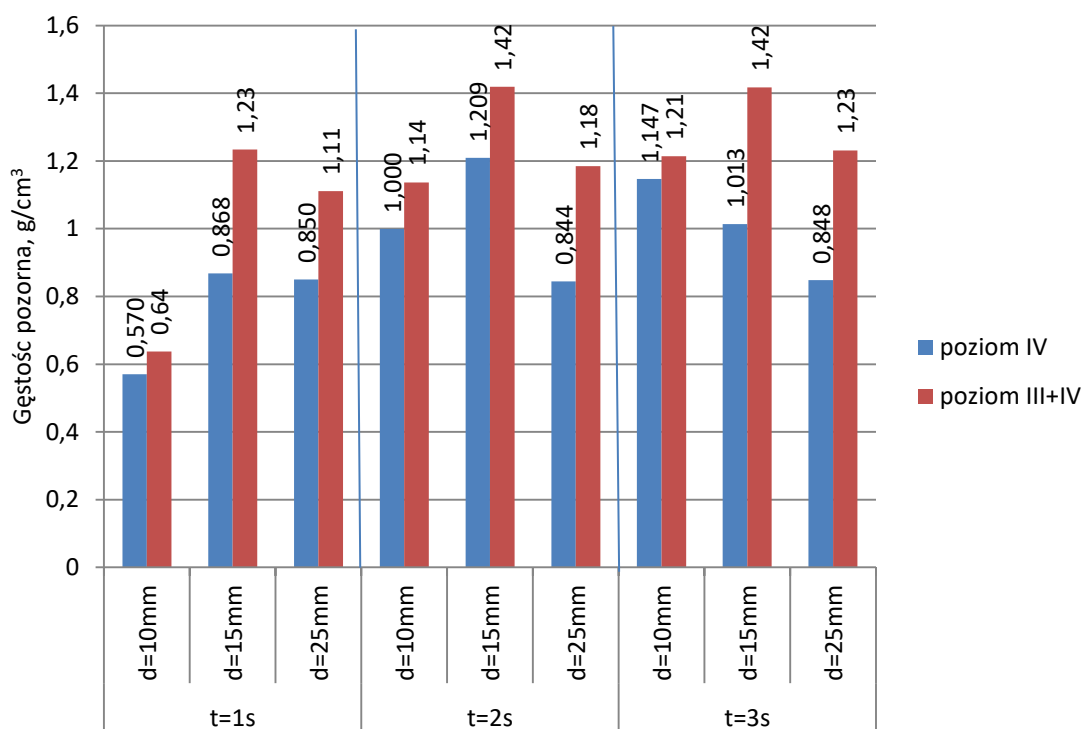


Rys. 91. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 3 s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju $317,4\text{ mm}^2$.

Przyjęte warunki brzegowe i podział rdzennicy na sektory w pełni potwierdzają efekt działania procesu podciśnieniowego na rozkład gęstości w sektorach w funkcji otworu strzałowego. Dla otworu $d=10$ mm (krzywa niebieska) rozkład jest zdecydowanie równomierny w porównaniu do zastosowanych otworów $d = 15\text{mm}$, $d = 25\text{mm}$. Wraz ze wzrostem średnicy $d=15\text{mm}$, $d=25\text{mm}$ zmienia się równomierność rozłożenia, natomiast wzrasta zagęszczenie. Osiągany efekt wskazuje, że przy zwiększonych średnicach przepływ jest bardziej intensywny.

Kolejnymi parametrami, które uwzględniono w badaniach jest czas pozostawiania zaworu w pozycji otwartej (1, 2, 3s) i poziomy usytuowania odpowietrzeń, które uwzględniają zgrupowane otwory odpowietrzające III+IV, IV. W zależności od czasu ilość zassanej masy rdzeniowej wzrasta wraz ze wzrostem czasu. Podobnie ilość masy zassanej wzrasta w zależności od ilości otworów odpowietrzających.

Na podstawie szczegółowych charakterystyk (rys.86-91) sporządzono wykres słupkowy (rys.92), na którym przedstawiono rozkład gęstości pozornej zależnej od istotnych parametrów uwzględnionych w pojedynczych wariantach badawczych. Postać słupkowa wykresu jest dogodna do analizy i oceny osiągniętej gęstości pozornej wyznaczonej w poszczególnych wariantach. Wielkością, która ma istotny wpływ na wartość gęstości jest odpowietrzenie, czyli sumaryczna powierzchnia otworów odpowietrzających zaznaczona poziomem III+IV ($317,4 \text{ mm}^2$) i poziomem IV ($158,7 \text{ mm}^2$). Największą wartość gęstości pozornej $1,287\text{g/cm}^3$ osiągnięto w wariantcie II (średnica otworu strzałowego 15mm, czas otwarcia zaworu podciśnieniowego 2s, otwarte otwory odpowietrzające na poziomie III+IV). W tym samym wariantcie przy poziomie otwarcia IV wartość gęstości pozornej wynosi $1,096 \text{ g/cm}^3$. Z podanych przekrojów można wyznaczyć stopień odpowietrzenia, który dla przytoczonych wartości (wariant II) poziom odpowietrzenia III+IV, wynosi 1,79, a dla poziomu IV, stopień odpowietrzenia wynosi 0,89. Im wyższy stopień odpowietrzenia, tym większa wartość gęstości pozornej. Wykazany stopień odpowietrzenia jest ogólnie zasadny dla procesów dmuchowych.



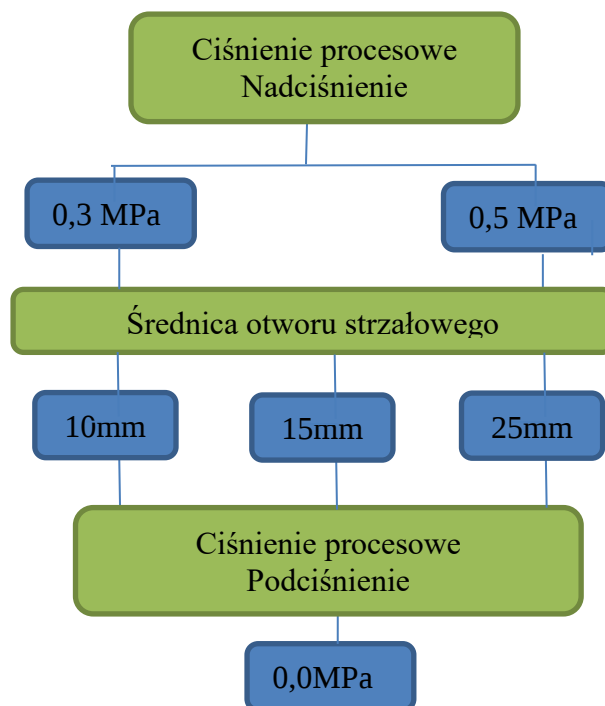
Rys. 92. Gęstość pozorna masy rdzeniowej w rdzennicy przy zastosowanym otworze strzałowym $d = 10, 15, 25\text{mm}$, w funkcji czasu otwarcia $t = 1, 2, 3\text{s}$, przy otwartych poziomach odpowiedzeń III+IV ($317,4\text{ mm}^2$), IV ($158,7\text{mm}^2$), $p_p = 0,0\text{MPa}$.

13. Badania technologiczne w zintegrowanym procesie nadciśnienia z podciśnieniem

Program badań opracowano na podstawie analizy i oceny wyników z badań technologicznych zrealizowanych oddzielnie dla procesu nadciśnieniowego i podciśnieniowego. Przyjęto następujące warunki brzegowe:

- a) stanowisko badawcze do zintegrowanego procesu wykonywania rdzeni metoda strzałowa z zastosowaniem wspomagania podciśnienia zgodnie z punktem 10.2. rysunek 20,
- b) sterowanie zaprojektowane stosownie do funkcjonalności procesu zintegrowanego,
- c) system podłączenia rdzennicy do układu strzelarki zgodnie z kryteriami technicznymi i technologicznymi zintegrowanego procesu,
- d) rdzennica o podstawowej konstrukcji bez przegród dzielących komorę.
- e) rdzennica uzbrojona w wymienne przegrody, dzielące przestrzeń technologiczną na sektory,
- f) masa doświadczalna w technologii CO₂ stosowana w wcześniejszych badaniach z nadciśnieniem i podciśnieniem,
- g) stanowisko wyposażone w niezbędne przyrządy do sprawnego przeprowadzenia badań,
- h) metodyka wyznaczania parametrów technologicznych zagęszczonej masy w dwóch wersjach; bez zmian opisana w rozdziale 11 w warunkach rdzennicy podstawowej bez przegród i w warunkach rdzennicy uzbrojonej w przegrody.

Zintegrowany układ, ze względu na swoją złożoność, narzuca konieczność doboru parametrów procesowych z uwzględnieniem nadciśnienia i podciśnienia. Kombinację wartości nadciśnienia, średnic otworu strzałowego i wartości podciśnienia przedstawiono na rysunku 93. Poszczególne pozycje wymienione w kombinacji parametrów wynikają z dotychczasowych badań technologicznych w warunkach nadciśnienia i podciśnienia (punkt.12 str. 103-137).



Rys. 93. Parametry procesowe w zintegrowanym procesie
(Opracowanie własne).

Technologicznie przebieg badań obejmuje czynności związane z wykonaniem rdzenia metodą „równoczesnego” uruchomienia nadciśnienia i podciśnienia. Równoczesność procesu oznacza włączenie poszczególnych zaworów w oddzielnych instalacjach w tym samym momencie czasu. Rolę włączenia spełnia układ sterowania, a głównie zastosowany typ sterownika. Program sterownika daje także możliwość doboru poszczególnych zakresów czasowych niezbędnych do sterowania długością trwania procesu, koniecznego do uzyskania oczekiwanego zapełnienia komory technologicznej rdzennicy. Powszechnie stosowana metodyka określenia zapełnienia, definiowana jest współczynnikiem zapełnialności rdzennicy K_{zr} [14, 15, 16, 27], który określa wpływ czynników procesowych na zapełnienie rdzennicy.

Badania przeprowadzono przy zadanych warunkach brzegowych:

- nadciśnienie: 0,3MPa, 0,5MPa zadane w zbiorniku wyrównawczym, wypływ powietrza uruchamiany zaworem typu Hansberg – wypływ powietrza,
- podciśnienie: 0,0 i 0,05MPa zadane w układzie pompa próżniowa, zbiornik, zawór uruchamiający podciśnienie – zasysanie powietrza,
- otwory strzałowe: $d = 10, 15, 25\text{mm}$

- czas otwarcia zaworu nadciśnieniowego: $t = 1s$,
- czas otwarcia zaworu podciśnieniowego: $t = 1, 2, 3s$,
- poziomy otwarcia otworów odpowietrzających; I+II+III+IV, odpowiednio o przekrojach $872,8mm^2$ (całkowite odpowietrzenie) i IV ($158,7mm^2$).

Przyjęte wartości czasu otwarcia zaworu podciśnieniowego wynikają z poprzedniego etapu badań i uzasadniają możliwość osiągnięcia skutecznego rozkładu zagęszczenia w procesie zintegrowanym.

Badania przeprowadzono dwu etapowo z uwzględnieniem rdzennicy bez przegród i z przegradami.

13.1. Badania zapełniania rdzennicy bez zamontowanych przegród

Wprowadzeniem do badań zasadniczych przyjęto rdzennicę bez przegród. Hipotetycznie na podstawie wniosków z poprzednich etapów stworzono warianty badawcze. W założeniu badanie wariantów zmierza do eliminacji niektórych wcześniej określonych warunków brzegowych, nierokujących oczekiwanego efektu wypełnienia rdzennicy.

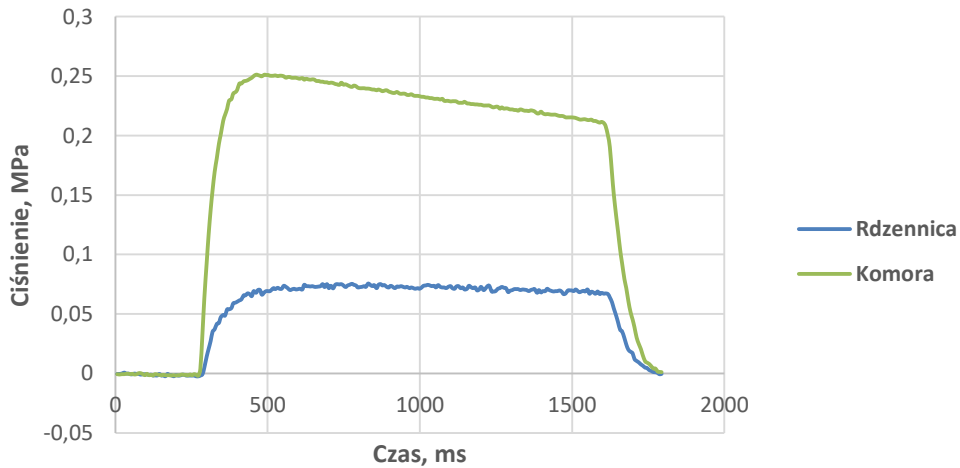
Istotą wariantowania programu jest pogrupowanie parametrów konstrukcyjnych i procesowych pod względem zakładanych i mierzalnych wielkości; średnica otworu strzałowego, wartość nadciśnienia, podciśnienia i powierzchni otworów odpowietrzających.

Założenia procesowe do wariantu I

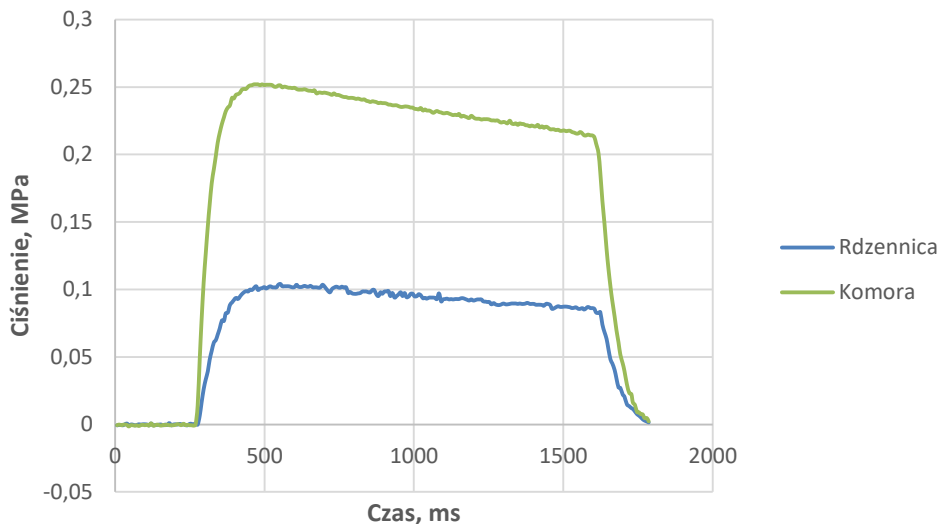
Istota wariantu pierwszego jest zweryfikowanie oddziaływania podciśnienia na proces zintegrowany. Przyjęto następujące wielkości:

- otwór strzałowy o średnicy 10mm i nadciśnienie 0,3MPa, czas otwarcia zaworu nadciśnienia 1s,
- podciśnienie 0,0 i 0,05MPa, jako kryterium oceniające skuteczność procesu podciśnieniowego. Przyjęte wartości 0,0 i 0,05MPa wynikają z możliwości technicznych uzyskania w instalacji. Czas otwarcia zaworu podciśnieniowego 3s, przy tym czasie wystąpiły najlepsze efekty wpływania masy do rdzennicy.
- odpowietrzenie poprzez wszystkie otwory o największej wartości przekroju $872,8mm^2$, stopień odpowietrzenia $S_{odp}=11,11$.

Zgodnie z założeniami wariantu pierwszego wykonano wykresy przebiegu ciśnienia w procesie zintegrowanym dla komory naboowej i rdzennicy dla dwóch podciśnień 0,0 i 0,05MPa, i nadciśnienia 0,3MPa, które przedstawiono na rysunkach 94 i 95. W rdzennicy przy zadanych podciśnieniach zaobserwowano widoczne zmiany, przy niższym podciśnieniu uzyskano 0,07MPa, natomiast przy wyższym 0,1MPa.

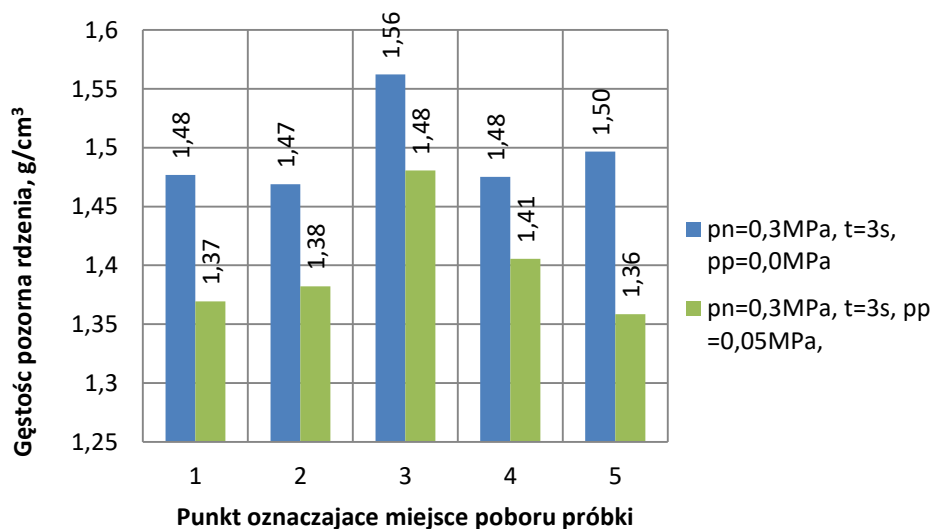


Rys. 94. Przebieg ciśnienia w komorze naboowej i rdzennicy, $p_n = 0,3\text{MPa}$, obniżone ciśnienie (podciśnienie) $p_p = 0,0\text{MPa}$ otwór strzałowy, $d = 10\text{ mm}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I, II, III, IV o łącznym przekroju $872,8\text{mm}^2$.



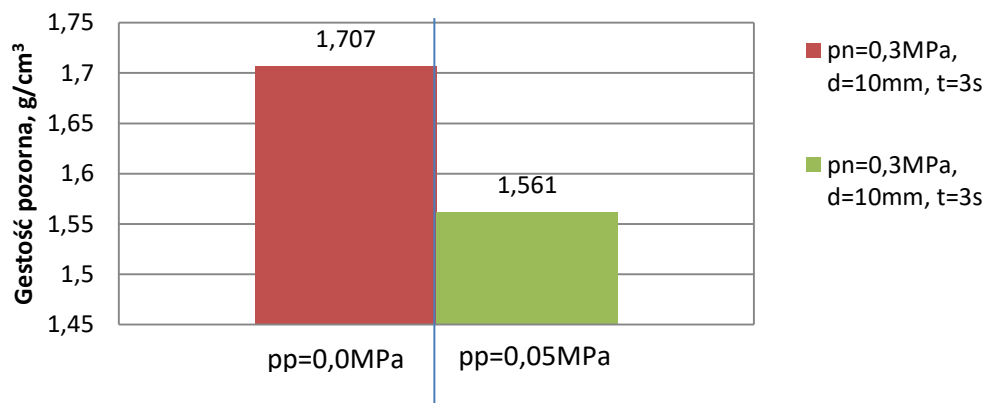
Rys. 95. Przebieg ciśnienia w komorze naboowej i rdzennicy, $p_n = 0,3\text{MPa}$, obniżone ciśnienie (podciśnienie) $p_p = 0,05\text{MPa}$ otwór strzałowy, $d = 10\text{ mm}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I, II, III, IV o łącznym przekroju $872,8\text{mm}^2$.

W warunkach spełnienia założeń procesowych w wyniku prowadzonych badań uzyskano rozkłady gęstości, które przedstawiono na rysunku 96 i 97.



Rys. 96. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w warunkach: nadciśnienia $p_n=0,3\text{MPa}$, i obniżonego ciśnienia (podciśnienie) $p_p = 0,0\text{MPa}$ oraz $0,05\text{MPa}$ otwór strzałowy, $d=10\text{mm}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t=3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I, II, III, IV o łącznym przekroju $872,8\text{mm}^2$.

W trakcie prowadzonych badań wstępnych przy zadanym otworze 10mm stwierdzono nie dopełnienie rdzennicy. Nie dopełnienie określone współczynnikiem zapełnialności, którego wartość wynosiła 74,5%. W warunkach niedopełnienia określenie gęstości pozornej metodą sondowania nie było możliwe. Po uruchomieniu podciśnienia i stworzenia warunków procesu zintegrowanego rdzennica została zapełniona, tym samym wystąpiły warunki do pobierania próbek sondowania. Niezależnie od metody sondowania, dla celów porównawczych, zastosowano dodatkowo metodę wagowego określania gęstości pozornej. Wyniki rozkładu gęstości pozornej metodą sondowania i wagową przedstawiono graficznie na rysunkach 96 i 97. W pełnej analizie efektu nadciśnienia i podciśnienia należy łącznie rozpatrywać zmianę rozkładu gęstości pozornej bazując na rysunkach 96 i 97.



Rys. 97. Zależność średniej gęstości masy od podciśnienia roboczego.

Porównanie rozkładu gęstości ujawnia różne jej wartości w zależności od zastosowanej metody pomiarowej, co wskazuje na odmienną dokładność pomiarową. Przy małej gęstości pozornej masy metoda oparta o wycinanie próbek za pomocą sondowania jest wyraźnie mniej dokładna, co wynika z tego, że wciskana do masy sonda powoduje wypychanie na boki pewnej ilości wycinanej próbki, a poziom górnej powierzchni wycinanej próbki jest obniżony w stosunku do otaczającej sondę powierzchni masy. Kierunkiem do częściowego poprawienia dokładności metody sondowania jest przyjęcie zmodyfikowanego rozłożenia miejsc pobrania próbek. Dokładny schemat przedstawiono na rysunku 91 i opisano w wariancie trzecim.

W wyniku zintegrowanego procesu następuje wypełnienie rdzennicy, natomiast w wyniku podciśnienia, dodatkowo następuje ujednorodnienie ułożenia warstw masy rdzeniowej. Wskazują na to wartości gęstości ułożone w kształt krzywych zobrazowanych na rysunku 96. Dopełnieniem charakterystyki przedstawionej na rysunku 96, jest porównawcze zestawienie dotyczące ilości masy wstrzelonej do rdzennicy (rys.97).

Zastosowane zmiany podciśnienia 0,0MPa i 0,05MPa obrazują wpływ na stopień zagęszczenia masy rdzeniowej. Docelowo będą kontynuowane badania tylko przy ciśnieniu 0,0MPa z uwagi na występujące różnice zagęszczenia przy stałych wartościach nadciśnienia.

W programie dalszych badań wyeliminowano podciśnienie o wartości 0,05MPa z powodu niekorzystnej gęstości przy stosowaniu otworu strzałowego 10mm.

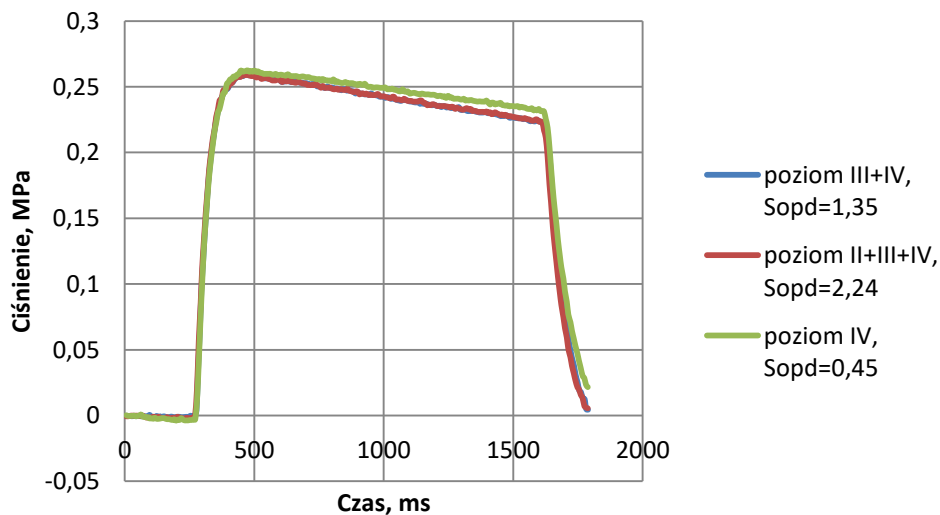
Dotychczasowe wyniki wskazują na skuteczne efekty stosowania nadciśnienia i podciśnienia, tym samym jest uzasadnienie do kontynuacji procesu zintegrowanego.

Założenia procesowe do wariantu II

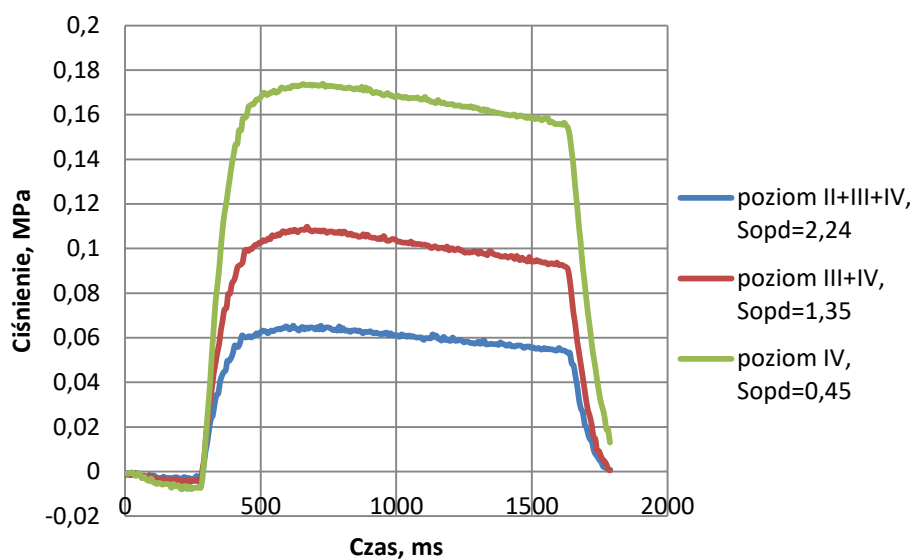
Istota wariantu drugiego jest zweryfikowanie oddziaływania nadciśnienia na proces zintegrowany. Przyjęto następujące wielkości:

- otwór strzałowy o średnicy 15mm, nadciśnienie 0,3 i 0,5MPa, czas otwarcia zaworu nadciśnienia 1s,
- podciśnienie 0,0MPa, jako kryterium oceniające skuteczność procesu końcowego zweryfikowane i przyjęte po badaniach w wariancie pierwszym,
- czas otwarcia zaworu podciśnieniowego 1, 2, 3s,
- odpowietrzenie poprzez otwory odpowietrzające na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 0,9$.

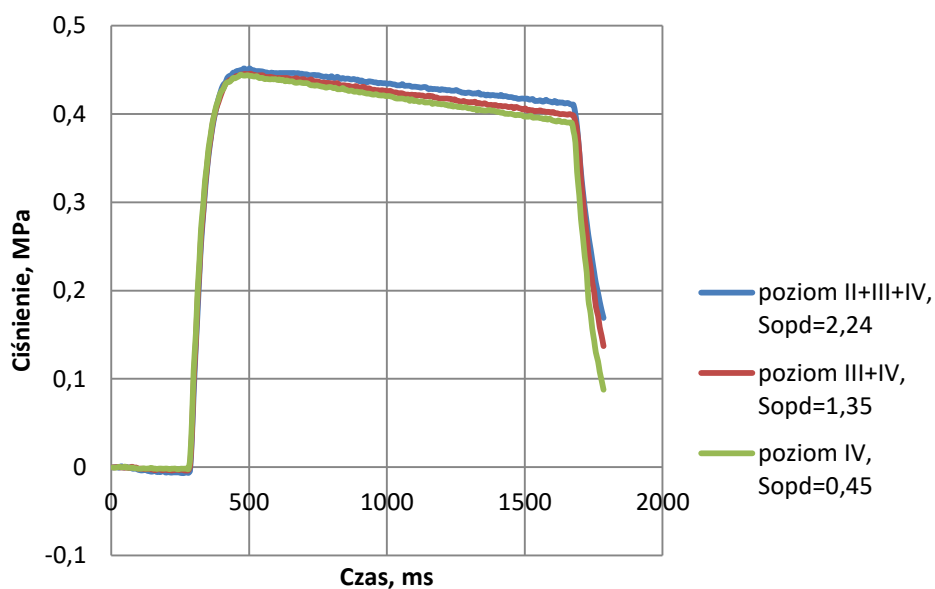
Na podstawie zgromadzonych danych sporządzono wykresy przebiegu ciśnienia w komorze nabojoyej i rdzennicy. Zbiór charakterystyk w procesie zintegrowanym przedstawiono na rysunkach 98 do 101 zgodnie z założeniami wariantu drugiego.



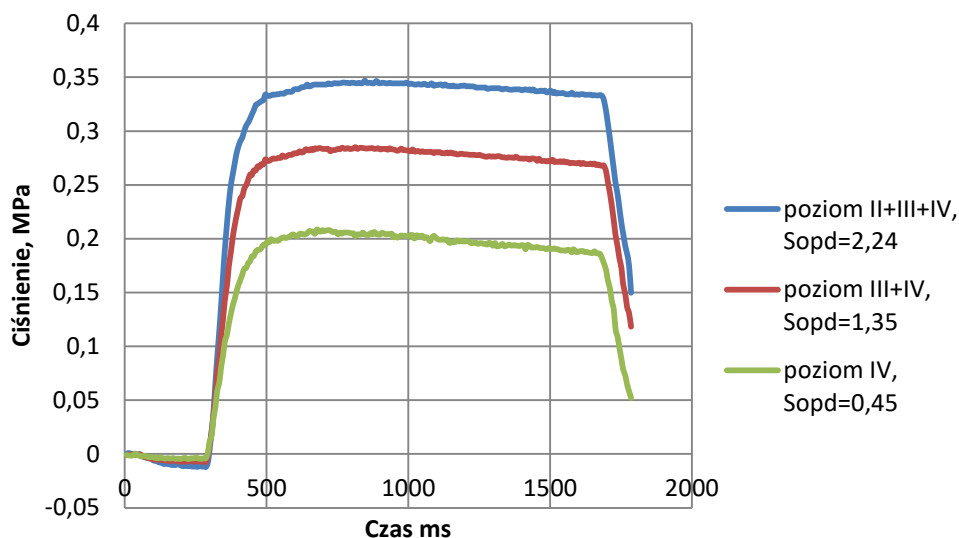
Rys. 98. Przebieg ciśnienia w komorze nabojoyej dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, $p_n = 0,3\text{MPa}$, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające na trzech określonych poziomach.



Rys. 99. Przebieg ciśnienia w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, $p_n = 0,3\text{MPa}$, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające na trzech określonych poziomach.



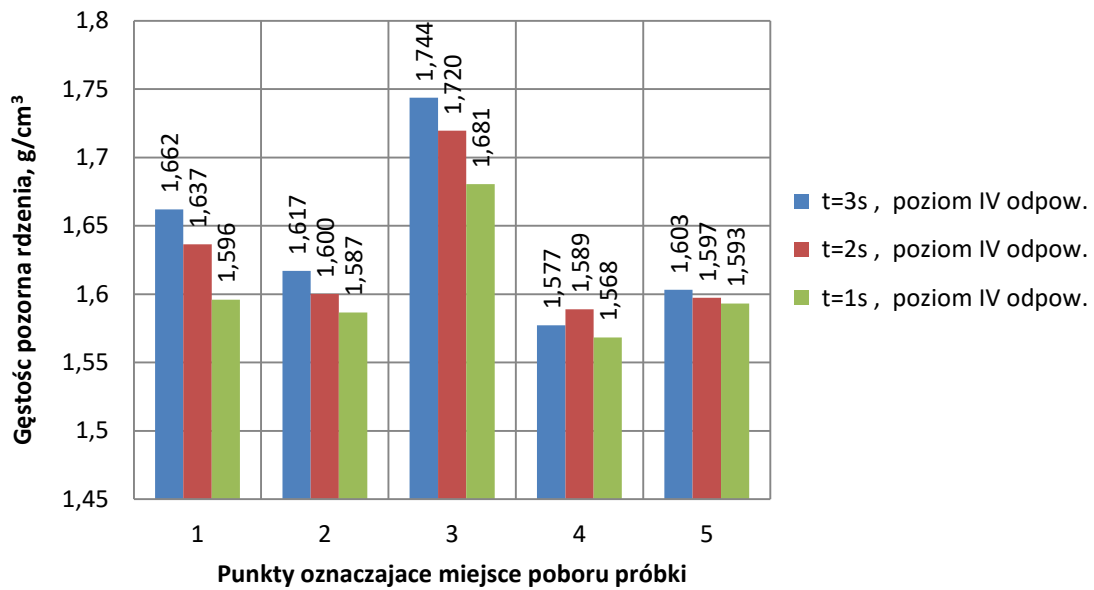
Rys. 100. Przebieg ciśnienia w komorze nabojowej dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, $p_n = 0,5\text{MPa}$, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające na trzech określonych poziomach.



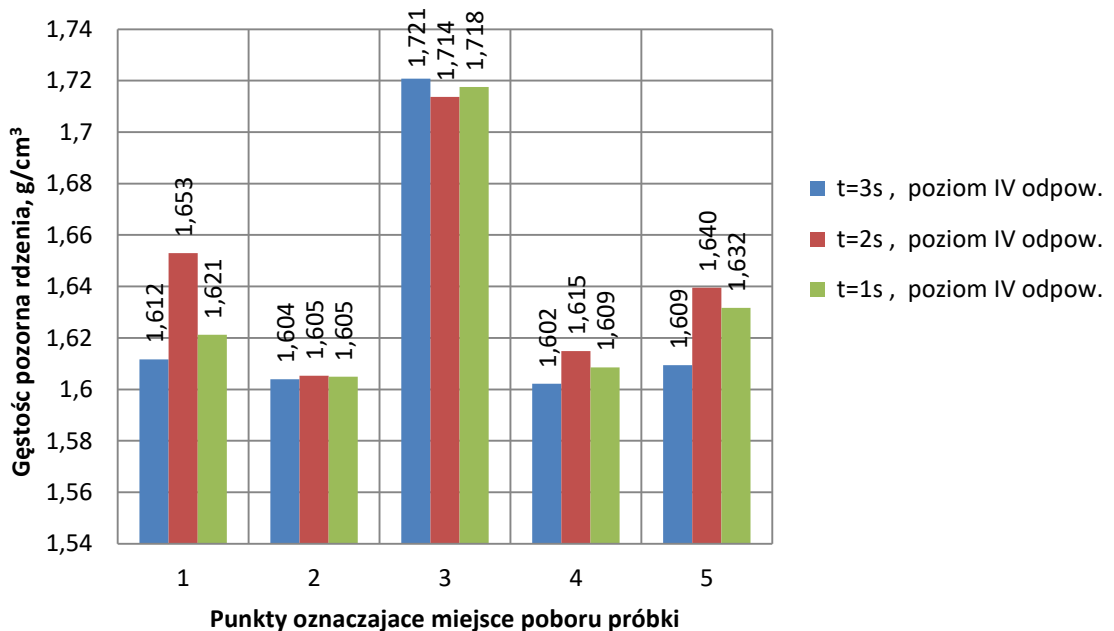
Rys. 101. Przebieg ciśnienia w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, $p_n = 0,5\text{MPa}$, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające na trzech określonych poziomach.

Powyższe charakterystyki przebiegu ciśnienia sporządzono dla przyjętej średnicy $d = 15\text{mm}$ i wyeksponowano je z podziałem na komorę nabojową (rys. 98, 100) i rdzennicę (rys. 99, 101). Przedstawione wykresy dotyczące komory nabojowej obrazują nieznaczny wpływ stopnia odpowietrzenia rdzennicy w analizowanym zakresie otwartych otworów odpowietrzających. Zmiany zaobserwowane na wykresach przebiegu ciśnienia w rdzennicy pokazują początkowe zadziałanie podcieniania w krótkim przedziale czasowym. Natomiast wartość zarejestrowanego ciśnienia w komorze rdzennicy ma rozrzut związany z powierzchnią otworów odpowietrzających, zmienia się proporcjonalnie w zakresie 0,06 do 0,17MPa dla ciśnienia strzału 0,3MPa oraz 0,2 do 0,35MPa dla ciśnienia strzału 0,5MPa.

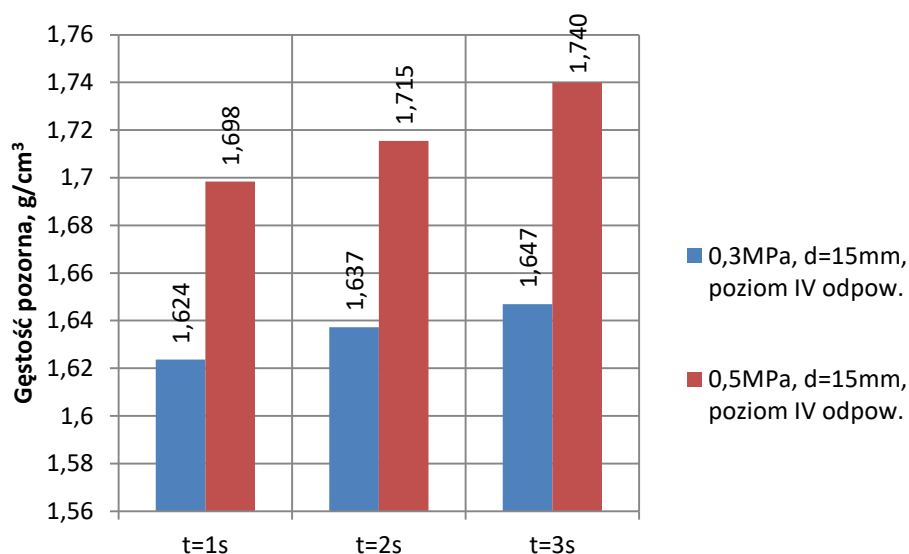
Przyjęta średnica 15 mm została zakwalifikowana już na etapie wstępnym procesu nadciśnieniowego, przy której wystąpiły najkorzystniejsze warunki procesowe. Występowało pełne zapęnlwienie rdzennicy, tym samym była możliwość zastosowania metody sondowania do określenia gęstości pozornej. Rozkład gęstości zależnej od czasu otwarcia zaworu podciśnieniowego i poziomu odpowietrzenia rdzennicy przedstawiono na rysunkach 102 i 103.



Rys. 102. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,3\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 1, 2, 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$.



Rys. 103. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,5\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 1, 2, 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$.



Rys. 104. Zestawienie gęstości pozornej masy rdzeniowej z bilansu wagowego, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, $S_{odp} = 0,45$.

Zestawienie porównawcze rozkładów gęstości pozornej zależnej od nadciśnienia i czasu trwania procesu przedstawiono w tabeli 27. Dane do tabeli zaczerpnięto z rysunków 102 i 103, natomiast pozycje dotyczącego procesu nadciśnieniowego przeniesiono z tabeli 24. Zmianę średniej gęstości pozornej określonej metodą bilansu wagowego w postaci wykresu słupkowego przedstawiono na rysunku 104.

Tabela 27. Tabela porównawcza rozkładu gęstości pozornej i pozornej średniej dla klasycznego procesu nadciśnieniowego i procesu zintegrowanego, określone metodą sondowania i wagową, otwory odpowietrzające na poziomie IV.

Proces klasyczny (nadciśnieniowy)							
„Poziom IV” odpowie- trzenia	Numer próbki					$\rho_{sr} [\text{g/cm}^3]$ (metoda sondowania)	ρ_r [g/cm^3] (metoda wagowa)
	1	2	3	4	5		
d=15mm, p = 0,3MPa	1,605	1,607	1,710	1,608	1,592	1,624	1,638
d=15mm, p = 0,5MPa	1,623	1,621	1,718	1,622	1,606	1,638	1,642

Tabela 27. Ciąg dalszy

Proces zintegrowany (podciśnienie 0,0MPa)							
d=15mm, p = 0,3MPa, t=1s	1,596	1,586	1,68	1,568	1,593	1,604	1,624
d=15mm, p = 0,3MPa, t=2s	1,636	1,60	1,719	1,589	1,597	1,628	1,637
d=15mm, p = 0,3MPa, t=3s	1,662	1,617	1,74	1,577	1,603	1,639	1,647
d=15mm, p = 0,5MPa, t=1s	1,611	1,603	1,72	1,602	1,609	1,629	1,698
d=15mm, p = 0,5MPa, t=2s	1,621	1,604	1,717	1,608	1,631	1,636	1,715
d=15mm, p = 0,5MPa, t=3s	1,652	1,605	1,713	1,614	1,639	1,644	1,740

Na charakterystykach (rys.102) w punktach przegięcia 1, 2 oraz 4, 5 dla ciśnienia 0,3MPa występują różnice w rozkładzie (tabela 27).

Wartości centralne rozkładu (pkt 3) wynoszą odpowiednio $1,68 - 1,74\text{g/cm}^3$ i wykazują różnicę w zakresie $0,1 - 0,12\text{g/cm}^3$. Wartości te zależne są od czasu otwarcia zaworu strzałowego.

W wymienionych punktach przegięcia 1, 2 oraz 4, 5 występują mniejsze różnice w rozkładzie względem rozkładu jak na rysunku 103.

Wartości centralne rozkładu w punkcie 3 wynoszą $1,71 - 1,72\text{g/cm}^3$. Natomiast w punktach 2, 4 wykazują wartość $1,60 - 1,62\text{g/cm}^3$. Pomiędzy wartościami w tych punktach występuje rozstęp $0,1 - 0,12\text{g/cm}^3$.

Porównując wartości rozstępu dla ciśnienia 0,3 i 0,5MPa, do dalszych badań przyjęto stosowanie ciśnienia 0,3MPa. Przy ciśnieniu 0,3MPa występują rejestrowane zmiany w rozkładzie gęstości zależne od czasu otwarcia zaworu podciśnieniowego.

Ważną rolę w efektach rozkładu spełniają otwory odpowietrzające, które pogrupowano i przypisano do poszczególnych poziomów I, II, III, IV. W trakcie badań zaobserwowano, że w rejonie otworów odpowietrzających wystąpił wzrost zagęszczenia, co wskazuje, że w tych miejscach ziarna są przyciągane i powstaje zjawisko zasysania. Im większa ilość otworów odpowietrzających (zwiększony sumaryczny przekrój), tym większe przyciąganie ziaren masy rdzeniowej. Uzasadnieniem takiego wnioskowania jest charakterystyka gęstości pozornej przedstawionej na rysunku 102, 103.

Reasumując można stwierdzić że wyniki uzyskane w II wariancie są zależne od przyjętych warunków brzegowych i z powodzeniem można je włączyć do programu III wariantu. Wielkościami, które będą poddane weryfikacji badawczej są czas otwarcia zaworu podciśnienia oraz odmienna metoda sondowania.

Założenia procesowe do wariantu III.

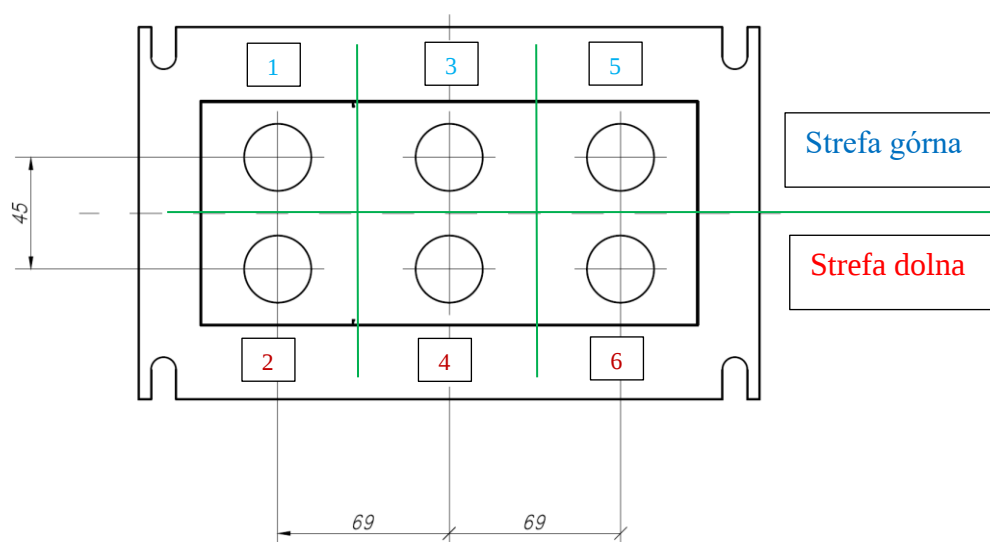
Istota wariantu trzeciego jest zweryfikowanie rozkładu gęstości pozornej wyznaczonej w wariancie drugim, poprzez zmienione rozłożenie miejsc pobierania próbek. Przyjęto następujące wielkości:

- otwór strzałowy o średnicy 15mm, nadciśnienie 0,3 i 0,5MPa, czas otwarcia zaworu nadciśnienia 1s. Przyjęta średnica została zakwalifikowana już na etapie wstępnym, pierwszym i etapie drugim,
- podciśnienie 0,0MPa, jako kryterium oceniające skuteczność procesu zintegrowanego zweryfikowane i przyjęte po badaniach w wariancie pierwszym i drugim. Wartość 0,0MPa jest skuteczna i niema potrzeby zwiększania podciśnienia ze względów technicznych ekonomicznych do wartości,
- czas otwarcia zaworu podciśnieniowego 2s, uzasadniony z bilansu czasowego otwarcia zaworu nadciśnieniowego i podciśnieniowego uwzględniający przedłużenie działania podciśnienia,
- odpowietrzenie poprzez otwory odpowietrzające na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$,

- odmienna siatka rozłożenia miejsc pobierania próbek względem głównej powierzchni rdzennicy. Rozłożenie miejsc poboru próbek decydująco wpływa na jednorodność gęstości pozornej w całej objętości rdzenia.

W programie badań dodatkowo uwzględniono czas działania podciśnienia wynoszący 2s. Rozszerzenie badań o 1 i 3s może wskazywać na możliwość uzyskania korzystnego wpływu na ostateczny wynik zapełnienia w przypadku badań rdzennicy z przegrodami. Przegrody dzielą rdzennicę na sektory technologiczne i można przewidywać, że oddziaływanie czasu również będzie miało wpływ na efekty w poszczególnych sektorach. W poszczególnych sektorach występują odmienne warunki działania podciśnienia.

Strukturę rozłożenia punktów sondowania w strefie górnej i dolnej przedstawiono na rysunku 105.

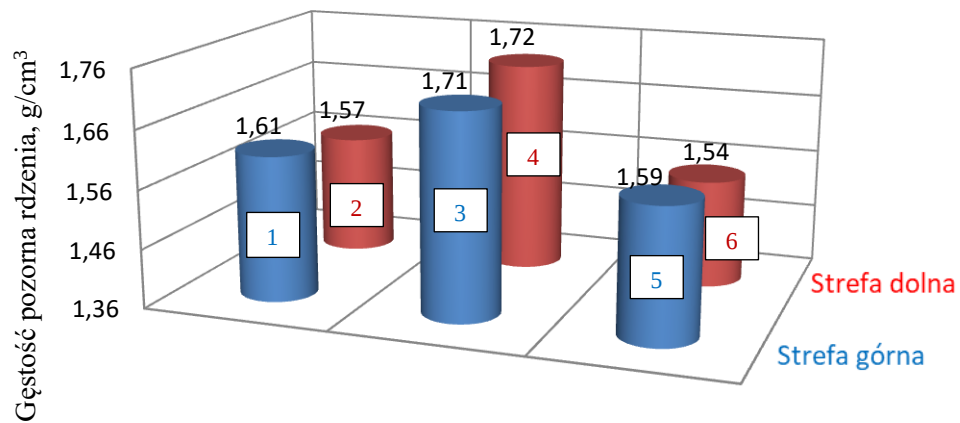


Rys. 105. Schemat poboru próbek z zastosowaniem przegród.

Nowe rozłożenie miejsc pobierania próbek usytuowane jest w układzie prostokątnym XY, z podziałem na dwa wiersze poziome (strefy) i trzy kolumny pionowe (sektory). Miejsca zlokalizowane w górnym wierszu są numerowane 1, 3, 5 natomiast miejsca w dolnym wierszu 2, 4, 6. Numeracja jest istotna i przekłada się na lepszą identyfikację gęstość pozorną w określonej części rdzennicy. Dodatkowo numeracja miejsc identyfikuje się z kolumną skrajną lewą i prawą oraz środkową ułożoną centralnie do otworu strzałowego. Łącznie wyznaczonych jest sześć symetrycznych miejsc sondowania. Podział na kolumny jest w ścisłym związku z rozłożeniem przegród w rdzennicy i tym samym z wydzielonymi sektorami. W ten

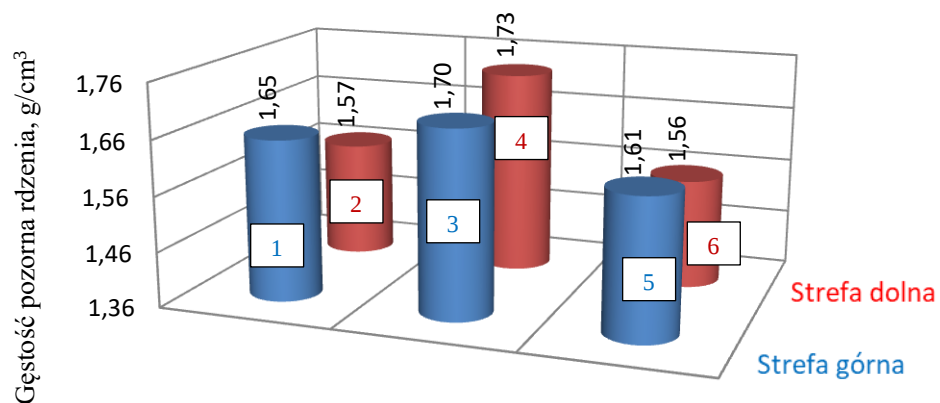
sposób stworzone są warunki do określenia rozkładu gęstości pozornej w poszczególnych sektorach, a przez to również w określonej odległości od otworu strzałowego.

W procesie badawczym po uwzględnieniu założeń i zmian w metodyce pobierania próbek oraz czasów trwania procesu podciśnieniowego osiągnięto następujące wyniki, które ujęto w postać graficzną na rysunkach 106 i 107.



Miejsca poboru próbek w strefie górnej i dolnej

Rys. 106. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,3\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 2\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$.



Miejsca poboru próbek w strefie górnej i dolnej

Rys. 107. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,5\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 2\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$.

Wartości osiągniętej gęstości pozornej w warunkach (rys. 106 i 107) zestawiono w tabeli 28. Zestawienie tabelaryczne jest ułatwieniem w przeprowadzeniu analizy porównawczej względem zmiennych procesowych.

Tabela 28. Rozkład gęstości pozornej w procesie zintegrowanym.

Ciśnienie	Gęstość pozorna			ρ_{sr} [g/cm ³] (metoda sondowania)	ρ_r [g/cm ³] (metoda wagowa)
Nadciśnienie $p_n = 0,3\text{MPa}$, Podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$	[1] 1,565	[3] 1,720	[5] 1,543	1,621	1,618
	[2] 1,607	[4] 1,707	[6] 1,586		
Nadciśnienie $p_n = 0,5\text{MPa}$, Podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$	[1] 1,571	[3] 1,729	[5] 1,557	1,636	1,641
	[2] 1,652	[4] 1,697	[6] 1,611		

Porównując wartości gęstości pozornej określonej metodą sondowania i metodą wagową stwierdzono rozrzut gęstości pozornej na poziomie 0,05 przy ciśnieniu 0,3MPa, natomiast przy ciśnieniu 0,5MPa rozrzut na poziomie 0,03. Mała wartość rozrzutu w warunkach rdzennicy bez przegród, nie preferuje jednej z metod określania gęstości. Do praktycznego zastosowania należy kierować się łatwością pobierania próbek w konkretnych warunkach technologicznych. W przypadku rdzennicy z przegrodami i wskazane jest zastosowanie metody sondowania, jako bardziej wiarygodnej z uwagi na możliwość rozdzielnego określenia gęstości pozornej w każdym sektorze przestrzeni technologicznej rdzennicy.

13.2. Badania w warunkach z przegrodami w rdzennicy

Badania przeprowadzono w warunkach dodatkowego uzbrojenia rdzennicy w przegrody. Ideą wprowadzenia przegród było stworzenie warunków utrudnionego przepływu strumienia masy, z pewnym podobieństwem do rozbudowanych przestrzennie rdzeni odlewniczych. Stworzenie warunków utrudnionego przepływu

strumienia powietrzno-piaskowego, może przyczynić się do zwiększenia skuteczności wypełnienia rdzennicy w warunkach podciśnienia.

Praktycznym sposobem stworzenia dogodnych warunków było zastosowanie przegród z dolnymi wycięciami w kształcie szczelin prostokątnych ($2,5\text{cm}^2$), tak mocowanych, aby pomiędzy strefami możliwy był przepływ strumienia piaskowo-powietrznego. Przegrody zostały rozmieszczone symetrycznie względem otworu strzałowego, co dało podział na trzy równe przestrzenie o wymiarach $6,13 \times 8,5 \times 4,8\text{ cm}$ i każda o objętości - $250,57\text{cm}^3$. Kształt i rozłożenie przegród w rdzennicy przyjęto zgodnie z pozycją literatury [50 str.198, rys.5.40, b)]. Schemat rozłożenia przegród zastosowanych w badaniach przedstawiono w punkcie 12.2 na rysunku 84, natomiast dobór parametrów procesowych przedstawiono na rysunku 93.

Podstawą do badań były założenia podane na wstępie do punktu 13 oraz wyniki uzyskane na etapie badań rdzennicy bez przegród (pkt.13.1). W wynikach oprócz wartości mierzonych do opracowania rozkładu gęstości, znaczącą wartość miały obserwacje (wizualizacja procesu) dotyczące płynięcia strumienia powietrzno-masowego i zjawiska etapowości wypełniania rdzennicy. Zaobserwowany mechanizm płynięcia i rozkładu mieszaniny piaskowo-powietrznej kształtował się analogicznie jak wykazano w literaturze [50 str.237-239]. Zasadniczy strumień w momencie zetknięcia się z dnem rdzennicy i kolejnymi warstwami zagęszczonej masy, utworzonymi w osi otworu strzałowego rozpływał się do kolejnych wnęk w rdzennicy. Zapełnianie wnęk przebiegało etapami o różnej skuteczności wypełnienia. Ostateczne wypełnienie wnęk zostało zarejestrowane kamerą GO PRO 8. Zestawienie fotogramów przedstawiających zapełnienie komór po zakończeniu procesu podano w tabeli 29.

Tabela 29. Zestawienie fotogramów końcowej fazy zapelnienia rdzennicy modelowej, nadciśnienie 0,3MPa i podciśnienie 0,0MPa, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju 158,7mm² i poziom III+IV o łącznym przekroju 317,4mm², czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 1, 2, 3s$.

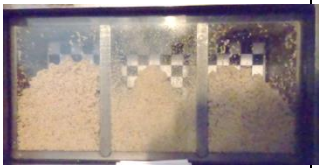
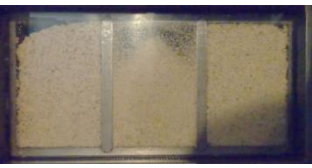
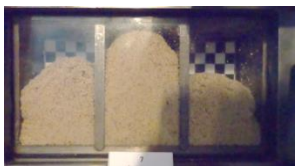
Otwór strzałowy 10mm			
Poziom odpowietrz enia rdzennicy	Czas otwarcia zaworu podciśnienia		
	1s	2s	3s
IV			
	$K_{zt}=32\%$	$K_{zt}=42\%$	$K_{zt}=72\%$
III+IV			
	$K_{zt}=41\%$	$K_{zt}=73\%$	$K_{zt}=89\%$
Otwór strzałowy 15mm			
Poziom	Czas otwarcia zaworu podciśnienia		
	1s	2s	3s
IV			
	$K_{zt}=49\%$	$K_{zt}=58\%$	$K_{zt}=65\%$
III+IV			
	$K_{zt}=76\%$	$K_{zt}=93\%$	$K_{zt}=94\%$

Tabela 29. Ciąg dalszy

Otwór strzałowy 25mm			
Poziom	Czas otwarcia zaworu podciśnienia		
	1s	2s	3s
IV			
	$K_{zt}=51\%$	$K_{zt}=52\%$	$K_{zt}=52\%$
III+IV			
	$K_{zt}=59\%$	$K_{zt}=71\%$	$K_{zt}=77\%$

Fotogramy ujawniają znaczące różnice w wypełnieniu komór rdzennicy, które są konsekwencją parametrów procesowych i konstrukcji zastosowanych wkładek. Niezależnie od wizualnego stopnia wypełnienia i jego oceny, zastosowano metodę wyznaczania współczynnika wypełnialności. Opis metody podany w punkcie 12.2 str. 123. Współczynnik wypełnialności K_{zt} przyjmowany jest przez autorów w opracowaniach dotyczących procesów dmuchowych, jako kryterium oceny ilościowej. Szczególną uwagę przy obliczaniu współczynnika wypełnialności należy zwrócić na warunki pobierania próbek. W sytuacjach nie wypełnienia stosowanie sondowania przy pobieraniu próbek byłoby niemożliwe. W takich sytuacjach należy posługiwać się metodą wagowego określania gęstości i bilansem masy użytej w komorze strzałowej i wprowadzonej do komory technologicznej.

Warunki badawcze przebiegu procesu były następujące:

- ciśnienie wstrzeliwania 0,3; 0,5MPa dla procesu nadciśnieniowego,
- ciśnienie 0,0MPa dla procesu podciśnieniowego,
- otwór strzałowy $d = 10, 15, 25\text{mm}$,

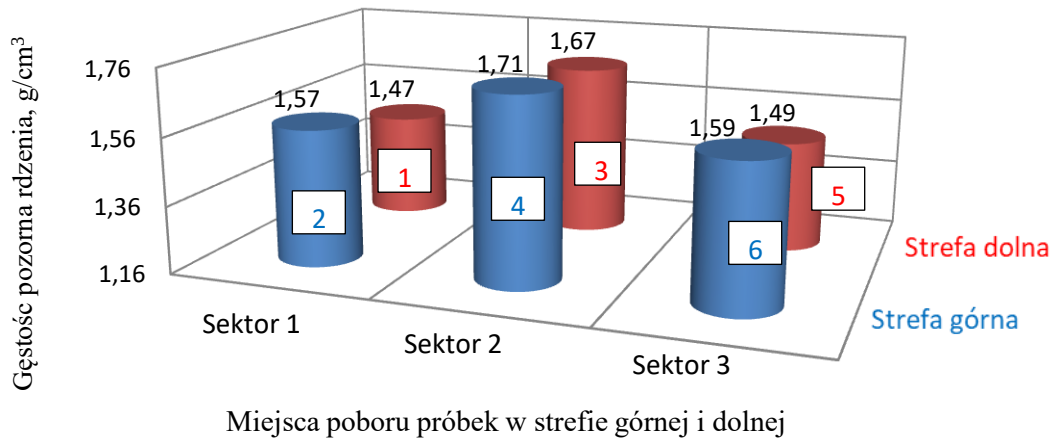
- odpowietrzenie rdzennicy, poziom IV = $158,7 \text{ mm}^2$, poziom III+IV = $317,4 \text{ mm}^2$,
- czas trwania procesu nadciśnienia $t = 1 \text{ s}$,
- czas trwania procesu podciśnienia $t = 1, 2, 3 \text{ s}$,
- przegrody dzielące rdzennicę na trzy sektory (rys. 84),
- masa rdzeniowa Cordis.

W trakcie trwania procesu strumień wykazywał swoją zmienność zależną od przyjętych warunków badawczych. Oznacza to, że energia sprężonego powietrza jest zmienna w czasie i z różnym skutkiem przekazywana masie rdzeniowej. To samo zjawisko przekłada się na energię w procesie podciśnieniowym.

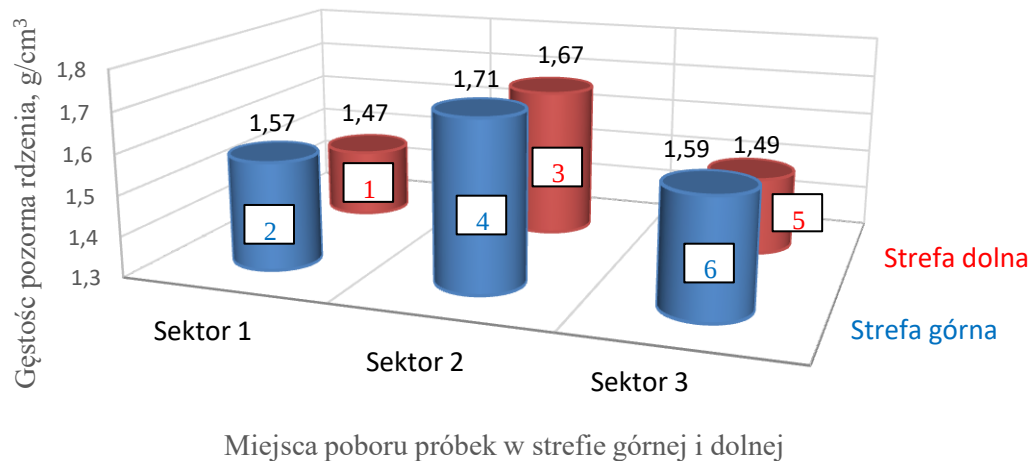
Konsekwencją tych wszystkich warunków jest skuteczność wypełnienia poszczególnych sektorów w rdzennicy. Wypełnienie sektorów jest funkcją otworu strzałowego i zwiększa się w zależności od czasu trwania podciśnienia, stopnia odpowietrzenia rdzennicy, i wartości ciśnienia w komorze nabojoyej. Stosownie do zastosowanych średnic otworu strzałowego i czasów trwania procesu podciśnieniowego obserwacje ujęto w grupy a, b, c o następującej charakterystyce:

- a) otwór strzałowy $d = 10 \text{ mm}$, pozostałe parametry, jak w warunkach badawczych. Efekt procesu - rdzennica w żadnym przypadku nie została wypełniona, co można tłumaczyć wolnym wpływem przez otwór strzałowy,
- b) otwór strzałowy $d = 15 \text{ mm}$. Efekt procesu:
 - dla zadanego czasu 2 i 3s, poziom odpowietrzenia III+IV, rdzennica została wypełniona we wszystkich sektorach. Osiągnięte wypełnienie daje możliwość pomiaru rozkładu gęstości i wykonania charakterystyk.
 - dla zadanego czasu 2 i 3s, poziomie odpowietrzenia IV, sektor centralny w rdzennicy jest całkowicie wypełniony, sektory boczne wypełnione w 50%,
- c) Otwór strzałowy $d = 25 \text{ mm}$ pozostałe parametry, jak w warunkach badawczych. Efekt rdzennica sektor centralny w rdzennicy w pełni wypełniony, odpowietrzenia IV, sektor centralny w rdzennicy jest całkowicie wypełniony, sektory boczne wypełnione w 40-60%.

Dla pozycji b) charakterystyki rozkładu gęstości pozornej mają postać podaną na rysunku 108 i 109.



Rys. 108. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,3\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 2\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju $317,4\text{ mm}^2$.



Rys. 109. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,3\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju $317,4\text{mm}^2$.

Zbiorne zestawienie wartości gęstości pozornej wyznaczonej dla pozycji b z podziałem na sektory i warunki procesowe podano w tabeli 30. W skrajnych

kolumnach podano gęstości średnie wyliczone z pomiarów w poszczególnych punktów z znaczeniem metody pomiarowej.

Tabela 30. Rozkład gęstości pozornej w sektorach i gęstości średniej.

Czas otwarcia zaworu podciśnienia	Gęstość pozorna ($d=15\text{mm}$, $p_n=0,3\text{MPa}$, $p_p=0,0\text{MPa}$, Poziom odpowietrzenia III+IV)			$\rho_{\text{sr}} [\text{g/cm}^3]$ (metoda sondowania)	$\rho_r [\text{g/cm}^3]$ (metoda wagowa)
	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3		
2s,	[1] 1,567	[3] 1,714	[5] 1,587	1,583	1,594
	[2] 1,470	[4] 1,671	[6] 1,490		
3s,	[1] 1,648	[3] 1,709	[5] 1,622	1,622	1,625
	[2] 1,531	[4] 1,670	[6] 1,548		

Celem badań było określenie wpływu parametrów procesu dmuchowego oraz kształtu przestrzeni technologicznej rdzennicy na rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej. W rdzennicy klasycznej o prostym kształcie (prostokątnej) w sytuacji nie zagęszczenia wyznaczenie rozkładu gęstości przeprowadzono metodą wagową, natomiast w sytuacjach wypełnienia rdzennicy posłużono się metodą pobierania próbek.

Rozkład gęstości pozornej odpowiadający charakterystyce na rysunku 96 osiągnięto przy pełnym odpowietrzeniu, przy którym nie występuje wymuszenie przepływu powietrza w określonym kierunku. Wyraźnie uwidacznia się nierównomierność zagęszczenia; największa w osi otworu strzałowego, i malejąca symetrycznie w stronę bocznych ścian komory. Wyniki tych badań posłużyły do wyznaczenia wykresu zależności wpływu ciśnienia wstrzeliwania na wartość współczynnika zapełnialności.

W następnej kolejności przeprowadzono badania z rdzennicą uzbrojoną w przegrody, gdzie zastosowano średnice otworu strzałowego 10, 15, 25mm. Stwierdzono, że zwiększenie średnicy otworu strzałowego, powoduje zwiększenie

gęstości pozornej w różnym stopniu w różnych sektorach przy tej samej wartości ciśnienia. Świadczyć to może o mniejszej koncentracji fazy stałej w strumieniu powietrza i poprawie właściwości hydrodynamicznych masy.

Kolejny cykl badań z rdzennicą z przegrodami obejmował pomiary gęstości pozornej w warunkach zmiany usytuowania otworów odpowietrzających na poziomie III+IV, o powierzchni $317,4 \text{ mm}^2$ oraz na poziomie IV $158,7 \text{ mm}^2$.

Analiza wyników wskazuje, że dla podobnych warunków (ciśnienie, średnica otworu strzałowego) większe wartości zagęszczenia osiągnęte są dla większego stopnia odpowietrzenia (poziom III+IV) względem odpowietrzenia o mniejszym stopniu (poziomu IV). Odpowiednie wartości stopnia odpowietrzenia wynosiły dla wymienionych poziomów $S_{\text{odp}} = 1,79$ i $S_{\text{odp}} = 0,89$.

Realizacja programu wskazała na możliwość zweryfikowania dotychczasowej wiedzy głównie w zakresie badawczym odnośnie procesu nadciśnieniowego i podciśnieniowego. Koncepcja rozszerzenia badań i przystosowania do procesu zintegrowanego jest w pełni uzasadniona, a wyniki z badań przyczynią się do pogłębienia wiedzy o procesach dmuchowych.

14. Podsumowanie i wnioski

Dotychczasowe badania były prowadzone przez różnych autorów z wyraźnym podziałem na podstawowe procesy z nadciśnieniem i podciśnieniem. W klasycznym procesie nadciśnieniowym tematyka badawcza uwzględniała konstrukcję maszyn dmuchowych oraz rdzennic. W maszynach dmuchowych analizowano wpływ takich elementów konstrukcyjnych i procesowych jak: średnice otworu strzałowego, pojemność komory strzałowej, dynamikę otwierania zaworu strzałowego. W konstrukcji rdzennic przedmiotem analizy była objętość komory roboczej, jej ułożenie poziome lub pionowe względem otworu strzałowego i geometria rozłożenia otworów odpowietrzających wraz z określeniem powierzchni czynnej. Uwzględniając fakt, że procesy podciśnieniowe były stosowane tylko w maszynach formierskich. Z grupy parametrów procesowych głównie uwzględniano wpływ nadciśnienia i podciśnienia, czasu otwarcia zaworów i dynamiki ich zadziałania.

Nadciśnienie spełnia swoją rolę w zakresie napełniania rdzennicy i jej zagęszczania przy wykorzystaniu takich rozwiązań wielootworowych głowic dmuchowych i systemów odpowietrzania rdzennic, które w dużym stopniu łagodzą naturalnie występujące zróżnicowanie gęstości rdzeni w ich objętości. W zależności od przyjętych parametrów konstrukcyjnych maszyn i rdzennic w połączeniu z parametrami procesowymi, jakość wykonania rdzenia spełnia w określonych warunkach stawiane wymagania technologiczne. Są sytuacje spowodowane rozbudowanym kształtem rdzenia, że rdzeń nie spełnia wymagań technologicznych.

W procesie podciśnieniowym głównie wykorzystuje się ciśnienie obniżone w stosunku do atmosferycznego w przestrzeni, do której podłączono „zasób” tak zwanej próżni w postaci zbiornika połączonego z pompą próżniową. Podciśnienie, jako proces mniej skuteczny w aspekcie dostatecznego zagęszczenia masy, powoduje takie uporządkowanie struktury przestrzennej osnowy, którego zadaniem jest uzyskanie większej jednorodności struktury zagęszczenia w całej objętości rdzenia. Uporządkowanie struktury przekłada się również na kierunkowe kształtowanie porowatości, a tym samym przepuszczalności rdzeni tworząc możliwość przepływu czynników stosowanych do chemicznego utwardzania rdzenia przez gazowe czynniki utwardzające w tym gorące powietrze.

Można stwierdzić, że trudno jest wskazać procesy mające jedynie same zalety, gdyż w aspekcie osiąganego zagęszczenia masy każdy cząstkowy proces może przyczynić się do zwiększenia jakości rdzeni poprzez połączenie wymiennych procesów i efektywne wykorzystanie w praktyce przemysłowej.

Głównym zamierzeniem badawczym rozprawy było stworzenie podstaw teoretycznych i praktycznych procesu dmuchowego w układzie zintegrowanym na stanowisku laboratoryjnym z możliwością równoczesnego przeprowadzenia procesu nadciśnieniowego i podciśnieniowego. W założeniach do metodyki badawczej zdefiniowano: warunki do stworzenia stanowiska badawczego – laboratoryjnego, opracowano założenia konstrukcyjne rdzennicy, parametry procesu nadciśnieniowego, podciśnieniowego i zintegrowanego oraz parametry technologiczne do oceny jakości wykonania rdzenia, które urzeczywistniono przynajmniej w takim stopniu jak to było możliwe w realnych warunkach.

Celem badań zasadniczych były pomiary, których analiza jest integralnym elementem służącym do udowodnienia postawionych tez.

Zrealizowany program badawczy przeprowadzony zgodnie z przyjętą metodyką umożliwił na doprecyzowanie charakterystyki indywidualnego procesu nadciśnieniowego i podciśnieniowego w warunkach nowej konstrukcji stanowiska i rdzennicy modelowej. W programie szczególną pozycją są badania zintegrowanego procesu pod względem konstrukcyjnym i procesowym. Badania ukierunkowane są na uzyskanie określonych parametrów oraz warunków, których spełnienie w sposób istotny uzasadnia założone tezy. Stanowisko badawcze wraz z instalacją wszystkich układów w pełni potwierdza możliwość spełnienia tezy pierwszej. Konstrukcja rdzennicy, w której wyeksponowane są otwory odpowietrzające połączone w zbiorcze kanały i pogrupowane na określonych poziomach symbolizujących różne sumaryczne przekroje otworów daje możliwość stworzenia warunków do kierunkowego przepływu strumienia piaskowo powietrznego. W przypadku procesu niskociśnieniowego postulat utworzenia (wywołania) gradientu ciśnienia, sformułowany w tezie II, można interpretować w ten sposób, że należy spowodować zmianę gęstości strumienia dwufazowego wprowadzonego do wnęki tak, aby zatrzymać jego część na otworach odpowietrzających przez dociśnięcie ziaren odnowy do siebie oraz ich unieruchomienie jeszcze w fazie przedprocesowej, a więc wcześniej niż nastąpi rozwinięty „dostrzał” o większym udziale fazy stałej. Strumień dostarczanej masy, jest specyficznym

zasobem fazy bogatej w powietrze, którym można łatwiej kierować przez kierowanie przepływem powietrza, które zawsze podąża w stronę instalacji o niższym ciśnieniu, a więc w stronę instalacji próżniowej.

Konstrukcja rdzennicy, w której wyeksponowane są otwory odpowietrzające połączone w zbiorcze kanały i pogrupowane na określonych poziomach symbolizujących różne sumaryczne przekroje otworów daje możliwość stworzenia warunków do kierunkowego przepływu strumienia piaskowo powietrznego. Ta część w konstrukcji w rdzennicy w pełni spełnia tezę drugą. Konstrukcyjne założenia stanowiska i aspekty technologiczne w konstrukcji rdzennicy uwzględniają możliwość przemodelowania na warunki przemysłowe. Zestaw w instalacji nadciśnienia i podciśnienia w warunkach przemysłowych będzie odmienny ze względu na gabaryty, stanowisko, strukturę przestrzenną, wielkość elementów tworzących instalację z uwzględnieniem przepustowości i wydajności. Konstrukcja rdzennicy powinna być rozpracowana pod względem ukształtowanych komór technologicznych i warunków odpowietrzenia.

Proces zintegrowany został zdefiniowany, jako równoczesne połączenie procesu nadciśnieniowego i podciśnieniowego. W części przygotowawczej do opracowania metodyki badawczej sporządzono schemat ideowy stanowiska badawczego pod względem konstrukcyjnym i technologicznym. W następnym etapie w nawiązaniu do przygotowanego schematu został zdefiniowany model procesu połączonego nadciśnienia z podciśnieniem. Podstawowym wymogiem do sporządzenia programu badawczego jest autorski model procesu zintegrowanego. W modelu tym nowością jest stworzenie warunków do równoczesnego identyfikowania procesów składowych z uwzględnieniem parametrów procesowych. Na bazie modelu przygotowano koncepcję projektową stanowiska badawczego.

Zdefiniowane grupy tematyczne w pełnym zakresie obejmują zadania, które zostały zrealizowane, tym samym osiągnięte wyniki potwierdzają spełnienie założonych celów:

1. Zintegrowanie dwóch zakresów procesu dmuchowego, czyli zwyczajowo stosowanego nadciśnienia występującego w układzie maszyny dmuchowej oraz podciśnienia wywołanego kontrolowanym strefowym odciąganiem powietrza z przestrzeni technologicznej w celu poprawy, jakości wykonywania rdzeni o rozbudowanej geometrii kształtu.

2. Uzyskanie możliwości wpływu na właściwości quasi-hydrauliczne strumienia piaskowo-powietrznego i przebiegu procesu technologicznego za pomocą dołączenia do konstrukcji rdzennicy dodatkowego układu z instalacją podciśnienia w miejscach rozłożenia otworów odpowietrzających a tym samym poszerzenie zakresu potencjalnego oddziaływania ciśnienia zarówno na zapełnianie, jak również na zagęszczenie masy z wykorzystaniem odpowiednio ukształtowanego gradientu ciśnienia we wnękach rdzennicy.
3. Poprawę jakości rdzeni wynikającą z możliwości zapełnienia pustek w trudnodostępnych sektorach rdzennicy i kontrolowanego zagęszczania oraz likwidację stref o niedostatecznej wytrzymałości.

Z grupy wymienionych celów spełnione są pozycje 1, 2, 3. Ostatnia pozycja 4 pośrednio wskazuje na pozytywny efekt w sytuacji zastosowania chemicznego utwardzania rdzeni.

Z badań wynika, jakie warunki odpowietrzenia powinny być spełnione pod względem stopnia odpowietrzenia. Nadrzędnym wymogiem jest konieczność zagwarantowania szczelności w instalacji podciśnieniowej, od której zależy skuteczność procesu. Podane wskazówki uzasadniają, jak należy postępować, aby model laboratoryjny był podstawą do stworzenia stanowiska przemysłowego. Podane wytyczne uzasadniają sformułowaną w pracy tezę pierwszą.

W aspekcie uzasadnienia tezy II można stwierdzić, że proces zintegrowany daje możliwość równomiernego upakowania osnowy ziaren w całej objętości. Równomierność rozłożenia przyczynia się do zmiany przepuszczalności w masie, co świadczy o stworzeniu przestrzeni i kanałów wolnych będących kanałami przepływu medium gazowego. W zależności od zastosowanego medium można wnioskować, że warunki przedmuchiwania jak i odprowadzania zużytego czynnika są sprzyjające do bezpiecznego prowadzenia procesu.

SPIS LITERATURY

1. Advanced casting technologies in Japan and Europe. WTEC Panel Report, March 1998.
2. Aksjonow P. N.: Wybrane zagadnienia z teorii maszyn odlewniczych. Wyd. "Śląsk", Katowice, 1965.
3. Aravin W. I., Numerov S. N.: Teoria dviženia židkostej i gazov v niedeformiruiemoi srede. Moskva 1953.
4. Aronstein N. M., Mardonov B.: Udarnye volny w peskostrelnom processie izgotovlenia form. Lit. Proizv. 4, 1972, 28-31.
5. Aronstein N. M.: Wlijanie konstrukcii peskostrelnogo rezervuara i osnastki na kačestwo form. Lit. Proizv. 2, 1971, 13-15.
6. Bakhiyarov S., Overfelt R.: Experimental and numerical study of sand core molding process. AFS Transaction 01-0049, 2001, 1-15.
7. Bakhtiyarov S I, Overfelt R A. CFD modeling and experimental study of resin-bonded sand/air two-phase flow in sand core making process. Powder Technol., 133, 2003, 68-78.
8. Boenisch D., Knauf M.: Kernschiessen - untersuchungen mit neuartigen Prufkorpern und verschiedenen Kernbindern., Giesserei 78(18), 1991, 640-646.
9. Dańko J.: Teoretyczna i doświadczalna weryfikacja modelu Aksjonowa obliczania maszyn dmuchowych. Archiwum Technologii Budowy Maszyn 10, 1992, 7-15.
10. Dańko J. Obliczanie i dobór parametrów konstrukcyjnych maszyn dmuchowych do rdzeni. Materiały Konferencji "Tendencje rozwojowe w technologii maszyn", Sekcja III Odlewnictwo i Spawalnictwo, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze, Zielona Góra 1990, 65 - 70.
11. Dańko J., Dańko R., Burbelko A., Skrzyński M.: Core blowing process – assessment of core sands properties and preliminary model testing. 10th International Symposium of Croatian Matallurgical Society. Metallurgy, 51(3), 2012, 415.
12. Dańko J., Dańko R., Burbelko A., Skrzyński M.: Parameters of the two-phase sand-air stream in the blowing proces. Archives of Foundry Engineering, 12(4), 2012, 25-30.
13. Dańko J., Dańko R., Burbelko A., Skrzyński M.: Proces wykonywania rdzeni odlewniczych metodami dmuchowymi – teoria i badania modelowe. Materiały III Konferencji Huttenes -Albertus Polska "Materiały formierskie i rdzeniarskie. Teoria i praktyka". Zakopane, 2012, 85-96.
14. Dańko J., Dańko R.: Assessment of core sand suitability for filling the core-box and for compaction. Archives of Foundry Engineering – Quarterly of Polish Academy of Sciences, The Katowice Branch, Commission of Foundry Engineering, 9(1), 2009, 37-40.
15. Dańko J., Dańko R.: Teoretyczne i technologiczne aspekty dmuchowych procesów wytwarzania rdzeni odlewniczych. Rozdział w monografii „Postępy

- teorii i praktyki odlewniczej.” Polska Akademia Nauk oddział Katowice, Komisja Odlewnicza. Wyd. Pod red. J. Szajnara, ISBN 978-83-929266-0-3, Katowice-Gliwice 2009. 71-86.
16. Dańko J., Dańko R.: Zależność zagęszczalności masy od współczynnika jej ewakuacji z aparatu strzałowo-dmuchowego, III Międzynarodowa Konferencja “Nowoczesne Technologie Odlewnicze Ochrona Środowiska, 7-9 wrzesień Kraków, 2000, 48-53.
 17. Dańko J., Dobosz S.: Badania porównawcze wybranych technologii zimnej rdzennicy.
I Konferencja Tendencje rozwojowe w mechanizacji procesów odlewniczych, Kraków 1994, 111–116.
 18. Dańko J., Fedoryszyn A.: Dobór parametrów wstrzeliwania i utwardzania rdzeni w technologii WZ. Przegląd Odlewnictwa 5, 1982, 129-132.
 19. Dańko J., Fedoryszyn A.: Badanie mechanizmu wypływu masy z komory naboowej strzelarki. III Ogólnopolska Konferencja WSI - Zielona Góra, 1977, 81-93.
 20. Dańko J., Fedoryszyn A.: Rola perforacji ścianek komory naboowej w procesie roboczym strzelarek. Przegląd Odlewnictwa. 11, 1971, 372-377.
 21. Dańko J., Karwacki J.: Dobór parametrów utwardzania rdzeni w nowoczesnych technologiach zimnej rdzennicy. Materiały ogólnopolskiej konferencji technicznej pt: Eksploatacja i unowocześnianie wyposażenia odlewni”, Odlewnia „CENTROZAP”
Sp. z oo, Kutno, 6 - 7 grudzień 1996, 41 - 48.
 22. Dańko J., Karwacki J.: The parameters of blowing and hardening process during manufacture of cores by main cold-box technologies. III International Conference „Economics and Ecology of Foundry Production ‘96”. Nitra 1996, 10-15.
 23. Dańko J., Kitala B.: Analiza zależności do obliczania natężenia wypływu masy w maszynach dmuchowych. XVI Sympozjum Naukowe ITiMO AGH, 1990, 87-97.
 24. Dańko J., Sobieraj R.: Podstawy Teorii Maszyn Odlewniczych. Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Skrypty Uczelniane nr 864, Laboratorium, wyd. III popr., Kraków 1982.
 25. Danko J., Wajszel P., Studzinski T.: Urządzenie do wytwarzania rdzeni odlewniczych. Patent PRL 112077, 1982.
 26. Dańko J., Zych J., Dańko R., Sroczyński A.: Badania struktury rozkładu gęstości pozornej masy w rdzeniach wykonanych za pomocą wstrzeliwania. Archiwum Odlewnictwa, 22(6), 2006, 133-139.
 27. Dańko J., Zych J., Dańko R.: Diagnostic methods of technological properties and casting cores quality. Archives of Metallurgy and Materials, 54(2), 2009, 281-286.
 28. Dańko J.: Metoda określania koncentracji strumienia piaskowo-powietrznego w strzelarkach. Metalurgia i Odlewnictwo 4 (z. 4), 1975, 499-509.

29. Dańko J.: Nowoczesne technologie wykonywania rdzeni – problem doboru parametrów roboczych maszyn dmuchowych. II Konferencja pt.: Tendencje rozwojowe w mechanizacji procesów odlewniczych. Wydział Odlewnictwa AGH, Kraków 25-26 listopada 1999, 63-69.
30. Dańko J.: Obliczanie i dobór parametrów konstrukcyjnych maszyn dmuchowych. VI Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna KTBM PAN (Poznań), 65-70, Zielona Góra 1990.
31. Dańko J.: Ocena procesu dmuchowego i jego efektów w świetle badań Boenisch i Knaufa oraz własnych. XIX Sympozjum Naukowe Wydziału Odlewnictwa AGH, Kraków 1993, 187 -194.
32. Dańko J.: Określanie wartości parametrów roboczych dla procesu nadmuchiwania rdzeni. Przegl. Odlewn. 11, 1973, 345-350.
33. Dańko J.: Parametry procesu dmuchowego i oprzyrządowania w nowoczesnych systemach zimnej rdzennicy. Przegląd Odlewnictwa, 2, 1995, 57-59.
34. Dańko J.: Proces zapelniania rdzennicy masą przy nadmuchiwaniu i strzelaniu. Rozprawa doktorska, Wydział Odlewnictwa AGH, Kraków 1972.
35. Dańko J.: Research problematics of casting technology machines and equipment Transactions of Foundry Research Institute. Volume LVI, 3, 2016, 157-173.
36. Dańko J.: Rozwój metod wstrzeliwania rdzeni. Przegl. Odlewn. 6, 1987, 184 - 188.
37. Dańko J.: Technological and Economical Aspects of Core Shooting, 34 Annual Convention Institute of Indian Foundrymen, 36 - 48, Bombay 1985.
38. Dańko J.: Właściwości dwufazowego transportu pneumatycznego strumienia powietrzno-piaskowego w maszynach dmuchowych”. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Mechanika z. 128, 27 - 28. 11. 1997, 7-15.
39. Dańko J.: Zjawiska występujące przy zapelnianiu skomplikowanych rdzennic metodą wstrzeliwania masy rdzeniowej. Metalurgia i Odlewnictwo, 1 (z.1), 1975, 125-143.
40. Dańko J.: Proces wytwarzania rdzeni i form odlewniczych metodami dmuchowymi. Badania i teoria. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne.
Seria: Rozprawy i Monografie nr 145, PL ISSN 0372-9443. Kraków 1992.
41. Dańko R., Jamrozowicz Ł.: Density distribution and resin migration investigations in samples of sand core made by blowing method. Journal of Casting & Materials Engineering. 1(3), 2017, 70–73.
42. Dańko R., Dańko J., Burbelko A., Skrzyński M.: Core blowing process – assessment of core sands properties and preliminary model testing. Archives of Foundry Engineering. 14(1), 2014, 25–28.
43. Dańko R., Dańko J., Skrzyński M.: Assessment of the possibility of using reclaimed materials for making cores by the blowing method. Archives of Foundry Engineering. 17(1), 2017, 21–26.

44. Dańko R., Dańko J.: Determination of the surface and volume porosity, on the basis of the main fraction of the polifractional matrix of moulding and core sands. *Archives of Foundry Engineering*, 16(4), 2016, 191–195.
45. Dańko R.: Compaction of cores made by blowing methods – model investigations. *Archives of Foundry Engineering*, 18(2), 2018, 191–197.
46. Dańko R.: Influence of the matrix grain size on the apparent density and bending strength of sand cores. *Archives of Foundry Engineering*, 17(1), 2017, 27–30.
47. Dańko R.: Investigations of the mechanism of the sand shooting into the core box. *Archives of Foundry Engineering*, 18(2), 2018, 191–197.
48. Dańko R.: Model wytrzymałości samoutwardzalnych mas formierskich z żywicami syntetycznymi w aspekcie zintegrowanego procesu recyklingu osnowy. Monografia. ISBN 978-83-929266-6-5. Wydawnictwo Archives of Foundry Engineering Katowice-Gliwice 2012.
49. Dańko R.: Podstawy teoretyczne i technologiczne doboru optymalnych parametrów regeneracji suchej zużytych mas odlewniczych, Rozprawa doktorska, Wydział Odlewnictwa AGH, Kraków 2006.
50. Dańko R.: Procesy dmuchowe i maszyny w technologiach wytwarzania rdzeni odlewniczych, Monografia, Wydawnictwo Archives of Foundry Engineering Katowice-Gliwice 2019
51. Dańko R.: Studies of the influence of the number and distribution of vents on the production process of cores by the blowing method. *Archives of Metallurgy and Materials*, 63(1), 2018, 105–111.
52. Dańko R.: Validation of the theoretical model of determining the strength of cores made by the blowing method. *Archives of Foundry Engineering*, 17(3), 2017, 27–30.
53. Dietert H.W.: Foundry core practice. AFS. Chicago 1952.
54. Egorov V V., Komarovski Yu. L. i inni: Poluavtomatičeskaja ustanovka dla izgotovlenija steržnej w gorjačih jaščikach. *Lit. Proizv.* 3, 1973, 15-20.
55. Ellinghaus W., Löhte K.: Wytwarzanie rdzeni z zastosowaniem fenolowego procesu CO₂ (proces Resol/CO₂), *Przegląd Odlewnictwa*, 11, 1996, 317-319.
56. Fayomi O., Ajayi O., Popoola A.: Suitability of local binder compositional variation on silica sand for foundry core making. *Int. J. Phys. sci.*, 6(8), 2011, 1940-1946.
57. Fedoryszyn A., Dańko J., Dańko R., Asłanowicz M., Fulko T., Ościłowski A.: Characteristic of core manufacturing process with use of sand, bonded by ecological friendly nonorganic binders. *Archives of Foundry Engineering*, 13(3), 2013, 19-24.
58. Fedoryszyn A., Dańko R.: Examinations of parameters influencing the outflow of two phase air-sand stream from machine chamber and core box filling in shooting process. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(3), 2013, 903-907.
59. Fiala A., Rusin K.: Vytvařovanie jader proudičim vzduchem. *Slevarenstvi* 5, 1975, 184-188.

60. Fiškin Yu. E., Serebriakov V. V. i inni: Osnastka dla izgotovlenia steržnej s produvkoj szatym vozduhom. Lit. Proizv. 4, 1974, 29-31.
61. Gade H. M.: Influence of blowhole diameter, vent area and air pressure in core blowing. The Foundry, 3, 82-83, 1959, 156 - 160.
62. Gawroński J.: Wybrane zagadnienia z technologii form odlewniczych z ćwiczeniami. Praca zbiorowa Część I, Skrypty Uczelniane Politechniki Śląskiej nr 775, Gliwice 1978.
63. Geidebrehov G. A.: Wlijanie filtracii vozduha v pory smesi na stepen jejo uplotnienia impulsnym sposobom. Lit. Proizv. 1, 1982, 32-33.
64. Geller R. L., Erkin V. V.: Vybor optimalnyh parametrov peskoduvno-pressovyh mašin. Lit. Proizv. 1, 1968, 18-22.
65. Geller R. L., Poplavski V. I.: Vybor optimalnyh konstruktivnyh parametrov robočih rezervuarov peskostrelnykh mašin. Lit. Proizv. 10, 1965, 13-17.
66. Geller R.L., Poplavski W.I.: O robočem processe peskostrelnykh mašin. Lit. Proiv. 9, 1965, 18-23.
67. Gerc E.W.: Dinamika pniewmaticszech sistem maszin. Maszgiz. Moskwa 1985
68. Gesell W.: Mechanisierung in der Kernmacherei. Giesserei t.46. 25, 1969, 958-960.
69. Gesell W.: Pneumatisches Verdichten bei der Formtechnik. Giesserei 7, 1971, 178-182.
70. Holtzer M., Dańko R., Bobrowski A., Żymankowska-Kumon S, Kmita A, Kubecki M.: Study of the harmfulness of molding and core sands with resins at high temperatures. Polska metalurgia w latach 2011–2014: Monografia; Komitet Metalurgii Polskiej Akademii Nauk. Kraków: Wydawnictwo Naukowe „AKAPIT, 2014, 467–481.
71. Horton K. B., Wade T., C: Cold box design. International GIFA Congress '94, 324-332.
72. Hurtova L. A., Černyh G. G., Kudrašev Yu. A. i inni: Faktory peskoduvno-peskostrelnogo processa. Lit. Proizv. 5, 1970, 22 - 25.
73. Hurtova M. A., Nikiforov J. A., Lesničenko V. L., Hurtov L. A.: Obrazovanie kanalov v robočem rezervuarie peskoduvnoj mašiny. Lit. Proizv. 8, 1974, 26- 29.
74. Hutera B.: Graniczne przypadki modelowych połączeń osnowa-spoivo w masach formierskich. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji. 29(1), 2009, 21-28.
75. Hutera B.: The effect of dynamic wetting in a sand – binder system on the sand mould strength. Archives of Metallurgy and Materials, 54(2), 2009, 413–419.
76. Iwanow D. P., Lesničenko V. L., Razumeiev Yu. A.: Sovmeščennaja formovka krupnykh litejnykh form. Lit. Proiz. 9, 1970, 6-12.
77. Jamrozowicz Ł.: Optymalizacja wytwarzania rdzeni utwardzanych w temperaturze otoczenia na przykładzie procesu fenolowego Ashland, Praca Magisterska, Wydział Odlewnictwa AGH, Kraków 2005.

78. Jeppesen V. A.: Das "blow-squeeze" formherstellungs verfahren. Einige Versuche mit dem Verdichtungsprozess. Kopenhagen 1964.
79. Junjiao Wu, Yi Cui, Wenzhen Li (2003): Computer simulation of core-shooting process with two-phase flow. International Journal of Cast Metals Research. Vol. 15. DOI: 10.1080/13640461.2003.11819526
80. Konstrukcja wykonanie i uruchomienie produkcji nowej generacji uniwersalnych strzelarek do wytwarzania rdzeni z mas wiązanych najnowszymi, proekologicznymi systemami spoiw". Projekt w ramach Programu INNOTECH w ścieżce programowej IN-TECH. Umowa nr INNOTECH – K2/IN2/69/183139/NCBR/12. Wykonawca: Ferro Masz T. Fulko i wspólnicy Sp. J, Współwykonawca: AGH, Wydział Odlewnictwa 2012.
81. Kur G. E.: Rasčet i konstruirowanie robočvch uzlov i osnastki peskoduwnyh mašin. Lit. Proizv. 10, 1971, 15-18.
82. Lefebvre D., Mackenbrock A., Vidal V., Pavan V., Haigh M.: Development and Use of Simulation in the Design of Blown-Cores and Moulds. Proceedings of 66WFC, vol. I, Istambul, 2004, 211-222.
83. Lesničenko V. L.: Klassifikacia metodov uplotnenia smesej potokom vozduha. Lit. Proizv. 2, 1982, 24-25.
84. Lesničenko V. L.: Nekotorye voprosy teorii peskoduvnogo processa. Lit. Proizv. 11, 1975 24-27.
85. Lesničenko V. L.: Rasčet i vybor parametrov formoobrazujuščih mašin s ispolzowaniem EWM. Lit. Proizv. 6, 1985, 23-27.
86. Lewandowski J.L.: Wpływ pola styku ziaren na wytrzymałość syntetycznych mas formierskich w stanie wilgotnym i anizotropia własności wytrzymałościowych. Zeszyty Naukowe AGH, nr 18, seria rozprawy, Kraków 1963.
87. Malinowski P.; Obliczenia numeryczne system pneumatycznego maszyn dmuchowych - symulacja, Wersja 1.0, Akademia Górniczo Hutnicza 2013.
88. M. Schneider, C. Heisser, A. Serghini, A. Kessler, Experimental investigation, physical modeling and simulation of core production processes. AFS Trans. 112, 2008, 419–432.
89. Mačašek J., Čech J.: Pouziti samocinnoho počítace ke stanoveni nekterych optimalnich parametrov vstřelovani forem a jader. Slevarenstvi 4 -5, 1969, 155-160.
90. Matveenکو J. V., Komarov L. Ye. i inni: Analiz reologičeskikh svoistv formovočnyh smesei i režimov ih uplotnenia. Vestn. Mašzinostr. 8, 1984, 59 – 62.
91. Melnikov V.S.: Adgezionnaia i kogezionnaia pročnost smolanogo sviazuiuščego. Soversšenstvovanie technologii litejnogo proizvodstva. Prem 1972.
92. Minaev G.I., Zykov A.P.: Mechanizm formirovania pročnostykh svojstv pesčano-smolianych obrazcov iz goriačoplakirovannyh smesej. Litiejnoe proizvodstvo, 1, 1994, 15-25.

93. Ni Chang-jiang, Lu Gao-chun, Zhang Qing-dong, et al. Influence of core box vents distribution on flow dynamics of core shooting process based on experiment and numerical simulation. *China Foundry*, 13 (1), 2016, 22-29.
94. Ocena szkodliwości materiałów wiążących stosowanych do mas formierskich i rdzeniowych nowej generacji. Praca zbiorowa pod redakcją Holtzer M., Dańko R. Wydawnictwo Naukowe „AKAPIT”, Kraków 2013.
95. Orłow G. M.: Mechanizm dynamicznego uplotnienia form. *Lit. Proizv.* 7, 1983, 3-5.
96. Orłow G. M.: Sowremennyye processy uplotnienia syryh pesčano-glinistykh form. *Lit. Proizv.* 4, 1983, 19-20.
97. Pelczarski S., Dańko J.: Dynamiczne oddziaływanie strumienia piaskowo-powietrznego na warstwy masy w rdzennicy. PAN - Kraków, *Metalurgia* 23, 1975, 147-161.
98. Pelczarski S., Dańko J.: The phenomena occurring during the filling of core-box on core blowers and shooters. *The British Foundryman*, LXIV (9), 1972, 2–12.
99. Pelczarski S., Danko J.: Theorie und Forschung des Kernblaspzesses. *Giesereitechn.* 3, 1969, 92-96.
100. Pelczarski S.: Proces nadmuchiwania rdzeni. IV rozdz. w pracy "Teoria procesów technologicznych w odlewnictwie", 317 - 351, WNT, Warszawa 1965.
101. Perzyk M., Waszkiewicz S., Kaczorowski M., Jopkiewicz A.: *Odlewnictwo*. WNT Warszawa 2004.
102. Peterson E. F.: Building and adapting core boxes for use in modern core blowing equipment. *Modern Casting* 1968.
103. Popławski V.I.: Analiz robočego processa peskoduvnyh mašin. *Lit. Proizv.* 10, 1976, 20-21.
104. Popławski V.I.: Wlijanie konstrukcii gilzy peskoduvnogo rezervuara na process istečenia smesi. *Lit. Proizv.* 2, 1977, 19-27.
105. Popov A.: Nowoczesne wytwarzanie rdzeni na strzelarkach firmy Laempe. *Przegląd Odlewnictwa* nr 5, 1993, 155-157.
106. Popov A.: Wytwarzanie rdzeni metodą cold-box - doświadczenia firmy Laempe. *Przegląd Odlewnictwa*, 2, 1994, 58-61.
107. Prandtl L. : *Dynamika przepływów*. PWN. Warszawa 1956.
108. Projekt badawczy: Badania mechanizmu procesu przepływu dwufazowego strumienia piaskowo powietrznego w procesie wykonywania rdzeni odlewniczych. Projekt OPUS. Narodowe Centrum Nauki, nr umowy UMO-2014/15/B/ST8/00206, realizacja 2014-2018, kierownik dr hab. inż. R. Dańko, prof. AGH.
109. Rabinowic A. P.: Voprosy teorii i rasčeta peskoduvnogo processa. *Lit. Proizv.* 8, 1961, 24-29.
110. Rakogon V. G.: *Teoria i praktika izgotovleniya steržnej peskoduvnym sposobom*. Mašgiz, Moskva 1962.

111. Reek R.: Optimierung des Füll-und Hartungsvorgangs von Giessereisandkernen durch 3-D Simulation der Strömungs-vorgänge. *Giessereiforschung* 57(3), 2005, 2 – 14.
112. Remnev A. B., Ryvkis Ja. M., Klimentow J. D.: Istečenie smesi pri postojannom davleni vozduha w peskoduvnom rezervuarie. *Lit. Proizv* 5, 1970, 41 - 42.
113. Resnick W., Heled Y., Klein A., Palm E.: Effect of differential pressure on flow of granular solids through of orifices. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*. 5(3), 1966, 392 - 396.
114. Sakwa W., Wachelko T.: Teoria i praktyka technologii mas formierskich. Wyd. "Śląsk", Katowice 1970.
115. Serghini A.: Przyszłość organicznych spoiw odlewniczych w Europie. *Przegląd Odlewnictwa*, 61(11-12), 2011, 548-550.
116. Ślęzyk M.: Analiza i modelowanie system formowania podciśnieniowego. Rozprawa doktorska. Wydział Odlewnictwa AGH. Kraków 2009.
117. Vidal V., Beauvais P., Leger-Delcourt E., Hossemand J.S., Sadon P.: Pressure distribution during core production in core blowing machines. *Fonderie Fondeur D’Aujourd’Hui*, 241, 2005, 12-20.
118. Walker M., Palczenski S., Snider D., Williams K.: Modeling Sand Core Blowing: Simulation’s Next Challenge. *Modern Casting*, April 2002, 41-43.
119. Winartomo B., Vroomen U., Buhrig-Polaczek A., Pelzer M; Multiphase modelling od core shooting process. *International Journal of Cast Metals Research*, 18(1), 13-20.
120. Wu Junjiao, Cui Yi, Li Wenzhen: A Study on Numerical Simulation of Core-Shooting Process. *Journal of Material Science and Technology*, 17(6), 2001, 625-628.
121. Razumov I.M.: Fluidyzacja I transport pneumatyczny materiałów sypkich. WNT Warszawa 1975.
122. Fedoryszyn A.: Zakres granicznych wartości parametrów I właściwości procesu fluidyzacji w urządzeniach odlewniczych. Praca doktorska ITMiO-AGH, Kraków 1977.

Spis rysunków

Rys. 1. Zmiana energii kinetycznej strumienia masy na różnych wysokościach rdzennicy zależności od usytuowania odpowietrzeń: 1 - odpowietrzeń w dolnej części rdzennicy, 2 - odpowietrzeń górne [100, 110].	22
Rys. 2. Charakterystyczne fazy przebiegu zapewniania wnętrza rdzennicy masą rdzeniową w procesie dmuchowym [36].	37
Rys. 3. Schemat klasycznej nadmuchiarki do rdzeni [100,101]: 1 - zasobnik masy..40	
Rys. 4. Schemat klasycznej strzelarki do rdzeni [100, 101]: 1 - zasobnik masy rdzeniowej, 2 - zawór dmuchowy, 3 - komora naboju, 4 - masa rdzeniowa, 5 - głowica dmuchowa, 6 - górna płyta odpowietrzająca, 7 - podstawa rdzenia, 8 - rdzennica.	41
Rys. 5. Model obliczenia strumienia powietrznego w maszynach dmuchowych [2] klasyczny Aksjonova. Oznaczenia: s - sieć sprężonego powietrza, a - komora naboju, c - rdzennica, d - atmosfera, μ , f , Ψ - wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.....	42
Rys. 6. Model obliczenia strumienia powietrznego w maszynach dmuchowych	45
Rys. 7. Model obliczenia strumienia powietrznego w maszynach dmuchowych [36] rozszerzony dla strzelarek wg. J.Dańko. Oznaczenia: s - sieć sprężonego powietrza, a - zbiornik wewnętrzny maszyny, p - przestrzeń przyzaworowa, b - komora naboju, c - rdzennica, d - atmosfera, μ , f , Ψ - wielkości charakteryzujące przepływ powietrza. ..	48
Rys. 8. Model obliczenia strumienia powietrznego w formie podciśnieniowej konwencji przedstawionej przez M.Ślęzyka [116]. Oznaczenia: a - przestrzeń technologiczna (rdzennica), b - przestrzeń pod płytą modelową, c - zbiornik podciśnieniowy, μ , f , Ψ - wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.	51
Rys. 9. Schemat ideowy oraz główne zespoły funkcjonalne stanowiska badawczego w tym: elementy układu nadciśnienia, elementy układu podciśnienia oraz elementy układu sterowania procesem strzałowym.	56
Rys. 10. Rozwinięty model obliczenia strumienia powietrznego piaskowego w rdzennicy z zastosowaniem podciśnienia opracowanie własne. Oznaczenia: s - sieć sprężonego powietrza, a - zbiornik wewnętrzny maszyny, p - przestrzeń przyzaworowa, b - komora naboju, c - rdzennica, d - przestrzeń przed zaworową (podciśnienia), e - zbiornik podciśnieniowy, μ , f , Ψ - wielkości charakteryzujące przepływ powietrza.	57
Rys. 11. Wersja trójsektorowej rdzennicy doświadczalnej stosowanej w przykładowych obliczeniach numerycznych przebiegu ciśnienia. Rdzennica ta odpowiada wersji rdzennicy oznaczonej R-4, z wkładkami „G” 2,5 cm ² [50].	62
Rys. 12. Poglądowe zestawienie funkcjonalnych zespołów stanowiska doświadczalnego do podciśnieniowego wspomagania procesu zapewniania i wstępnego zagęszczenia masy w 3 sektorowej rdzennicy strzelarki.	63
Rys. 13. Poglądowe zestawienie funkcjonalnych zespołów stanowiska doświadczalnego do zintegrowanego sposobu wspomagania procesu zapewniania i wstępnego zagęszczenia masy w 3 sektorowej rdzennicy strzelarki.	64
Rys. 14. Zrzut ekranu programu obliczeniowego Nova Licz do symulacji przepływu powietrza w maszynach dmuchowych [87].	66
Rys. 15. Wyniki obliczeń ciśnienia granicznego w zależności od średnicy otworu strzałowego dla ciśnienia strzału 0,3MPa.	69
Rys. 16. Wyniki obliczeń ciśnienia granicznego w zależności od średnicy otworu strzałowego dla podciśnienia 0,0MPa.	69

Rys. 17. Jednównękowa rdzennica doświadczalna R-1, stosowana w cytowanych badaniach ruchu strumienia piaskowo-powietrznego w procesie wstrzeliwania masy rdzeniowej [50].	73
Rys. 18. Widok stanowiska doświadczalnego przed modernizacją: 1 - instalacja sprężonego powietrza, 2 - trójsektorowa rdzennica doświadczalna, 3 - zawór typu Hansberg, 4 - komora nabojoya, 5 - przetwornik (czujnik) ciśnienia.	74
Rys. 19. Przegrody o różnych kształtach geometrycznych stosowane we wnętrzu rdzennicy doświadczalnej; a) wkładka z wycięciem dolnym o powierzchni $2,5 \text{ cm}^2$, b) wkładka z wycięciem dolnym o powierzchni $6,4 \text{ cm}^2$, c) wkładka z wycięciem dolnym o powierzchni $2,5 \text{ cm}^2$ i otworem centralnym o powierzchni $2,48 \text{ cm}^2$, d) wkładka z wycięciem dolnym o powierzchni $6,4 \text{ cm}^2$ i otworem centralnym o powierzchni $6,47 \text{ cm}^2$ [50- Monografia R.Dańko].	75
Rys. 20. Stanowisko badawcze do zintegrowanego procesu wykonywania rdzeni metoda strzałowa z zastosowaniem wspomaganie podciśnienia.	76
Rys. 21. Poglądowa konstrukcja nowo zaprojektowanej rdzennicy uwzględniająca rozmieszczenie otworów odpowietrzających (opracowanie własne).	79
Rys. 22. Sposób połączenia kanałów otworów odpowietrzających w rdzennicy (opracowanie własne).	80
Rys. 23. Widok nowej rdzennicy z zestawem przegród służących do podziału wnętrza na 3 sektory o różnym kształcie, położeniu i wymiarach otworów przepływowych (opracowanie własne).	81
Rys. 24. Projekt nowej przekładki stalowej: a), b) bez uszczelnień gumowych,	82
Rys. 25. Poglądowy rysunek kolektora zbiorczego (opracowanie własne).	83
Rys. 26. Schemat głównych elementów instalacji pomiarowej i rejestrującej.	85
Rys. 27. Widok ekranu startowego wyświetlacza.	85
Rys. 28. Widok ekranu uruchamiającego proces.	86
Rys. 29. Parametry procesowe badań wstępnych (opracowanie własne).	88
Rys. 30. Schemat opcji zamykania otworów odpowietrzających zgodnie dokonany opisem (opracowanie własne).	89
Rys. 31. Przebiegi ciśnienia granicznego w komorze nabojoyowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla różnych średnic „d” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym $0,3 \text{ MPa}$.	92
Rys. 32. Przebiegi ciśnienia granicznego w komorze nabojoyowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla różnych średnic „d” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym $0,4 \text{ MPa}$.	93
Rys. 33. Przebiegi ciśnienia w komorze nabojoyowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla różnych średnic „d” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym $0,5 \text{ MPa}$.	93
Rys. 37. Przebiegi ciśnienia w komorze nabojoyowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 10 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,3 \text{ MPa}$.	97
Rys. 38. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 10 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,3 \text{ MPa}$.	97
Rys. 39. Przebiegi ciśnienia w komorze nabojoyowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 15 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,3 \text{ MPa}$.	98
Rys. 40. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 15 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,3 \text{ MPa}$.	98
Rys. 41. Przebiegi ciśnienia w komorze nabojoyowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 25 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,3 \text{ MPa}$.	99
Rys. 42. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 25 \text{ mm}$, ciśnienie	99
Rys. 55. Parametry procesowe badań z nadciśnieniem (Opracowanie własne).	105
Rys. 56. Schemat miejsc pobierania próbek metodą sondowania, objętość próbki $31,4 \text{ cm}^3$.	106

- Rys. 57.** Rozkład gęstości dla otworu strzałowego $d = 10$ mm przy ciśnieniu roboczym 0,3; 0,4; 0,5MPa. Odpowietrzenie $872,8 \text{ mm}^2$, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 11,11$. 107
- Rys. 58.** Rozkład gęstości dla otworu strzałowego $d = 15$ mm przy ciśnieniu roboczym 0,3; 0,4; 0,5MPa. Odpowietrzenie $872,8 \text{ mm}^2$, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 4,94$. 107
- Rys. 59.** Rozkład gęstości dla otworu strzałowego $d = 25$ mm przy ciśnieniu roboczym 0,3; 0,4; 0,5MPa. Odpowietrzenie $872,8 \text{ mm}^2$, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 1,78$. 108
- Rys. 60.** Zależność średniej gęstości masy próbek testowych od ciśnienia roboczego. 110
- Rys. 61.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d = 10$ mm, $p = 0,3$ MPa wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń. 113
- Rys. 62.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d = 10$ mm, $p = 0,4$ MPa wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń. 113
- Rys. 63.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d = 10$ mm, $p = 0,5$ MPa wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń. 114
- Rys. 70.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji otworu strzałowego, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7 \text{ mm}^2$. .. 118
- Rys. 71.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji otworu strzałowego, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie II+III+IV o łącznym przekroju $476,1 \text{ mm}^2$ 118
- Rys. 72.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji otworu strzałowego, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I+II+III o łącznym przekroju $714,1 \text{ mm}^2$ 119
- Rys. 73.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji otworu strzałowego, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I o łącznym przekroju $396,7 \text{ mm}^2$ 119
- Rys. 74.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji ciśnienia otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7 \text{ mm}^2$ 120
- Rys. 75.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji ciśnienia, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie II+III+IV o łącznym przekroju $476,1 \text{ mm}^2$ 120
- Rys. 76.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji ciśnienia, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I+II+III o łącznym przekroju $714,1 \text{ mm}^2$ 121
- Rys. 77.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w funkcji ciśnienia, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I o łącznym przekroju $396,7 \text{ mm}^2$ 121
- Rys. 78.** Parametry procesowe w badaniach podciśnienia o wartości rzeczywistej $0,136 \cdot 10^{-4}$ MPa (Opracowanie własne). 124
- Rys. 79.** Przebieg ciśnienia w rdzennicy przy podciśnieniu roboczym $p = 0,0$ MPa, czas otwarcia podciśnienia 2s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I+II+III+IV o łącznym przekroju $872,8 \text{ mm}^2$ w połączeniu z instalacją do zaworu podciśnieniowego. 125
- Rys. 80.** Fotogram wypełnienia rdzennicy: średnica otworu strzałowego łączącego komorę naboju z rdzennicą $d = 15$ mm, podciśnienie 0,0 MPa, czas otwarcia zaworu $t = 3$ s, stopień odpowietrzenia $S_{\text{odp}} = 4,94$, stopień zapełnialności $K_{\text{zr}} = 67$ %. 127
- Rys. 81.** Fotogram wypełnienia rdzennicy: średnica otworu strzałowego $d = 25$ mm, podciśnienie 0,0 MPa, czas otwarcia zaworu $t = 3$ s, stopień odpowietrzenia 127
- Rys. 82.** Przebieg ciśnienia w rdzennicy przy włączonym systemie odciągania powietrza. Czas otwarcia podciśnienia 3 s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7 \text{ mm}^2$. Nastawa pompy $p = 0,0$ MPa. 128
- Rys. 83.** Przebieg ciśnienia w rdzennicy przy włączonym systemie odciągania powietrza. Czas otwarcia podciśnienia 3s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju $317,4 \text{ mm}^2$. Nastawa pompy $p = 0,0$ MPa. 128

Rys. 84. Poglądowa konstrukcja rdzennicy i przegroda z otworem dolnym o przełocie 2,5 cm ² .	131
Rys. 85. Schemat podziału rdzennicy na sektory i poboru próbek.	131
Rys. 86. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 1s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju 158,7mm ² .	133
Rys. 87. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 2s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju 158,7mm ² .	133
Rys. 88. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 3s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju 158,7mm ² .	134
Rys. 89. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 1s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju 317,4 mm ² .	134
Rys. 90. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 2s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju 317,4 mm ² .	135
Rys. 91. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej $p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia podciśnienia 3 s, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju 317,4 mm ² .	135
Rys. 92. Gęstość pozorna masy rdzeniowej w rdzennicy przy zastosowanym otworze strzałowym $d = 10, 15, 25\text{mm}$, w funkcji czasu otwarcia $t = 1, 2, 3\text{s}$, przy otwartych poziomach odpowietrzeń III+IV (317,4 mm ²), IV (158,7mm ²), $p_p = 0,0\text{MPa}$.	137
Rys. 93. Parametry procesowe w zintegrowanym procesie.	139
Rys. 94. Przebieg ciśnienia w komorze naboowej i rdzennicy, $p_n = 0,3\text{MPa}$, obniżone ciśnienie (podciśnienie) $p_p = 0,0\text{MPa}$ otwór strzałowy, $d = 10\text{ mm}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I, II, III, IV o łącznym przekroju 872,8mm ² .	141
Rys. 95. Przebieg ciśnienia w komorze naboowej i rdzennicy, $p_n = 0,3\text{MPa}$, obniżone ciśnienie (podciśnienie) $p_p = 0,05\text{MPa}$ otwór strzałowy, $d = 10\text{ mm}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I, II, III, IV o łącznym przekroju 872,8mm ² .	141
Rys. 96. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w warunkach: nadciśnienia $p_n = 0,3\text{MPa}$, i obniżonego ciśnienia (podciśnienie) $p_p = 0,0\text{MPa}$ oraz 0,05MPa otwór strzałowy, $d = 10\text{mm}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie I, II, III, IV o łącznym przekroju 872,8mm ² .	142
Rys. 97. Zależność średniej gęstości masy od podciśnienia roboczego.	143
Rys. 98. Przebieg ciśnienia w komorze naboowej dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, $p_n = 0,3\text{MPa}$, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające na trzech określonych poziomach.	144
Rys. 99. Przebieg ciśnienia w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, $p_n = 0,3\text{MPa}$, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające na trzech określonych poziomach.	145
Rys. 100. Przebieg ciśnienia w komorze naboowej dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, $p_n = 0,5\text{MPa}$, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające na trzech określonych poziomach.	145

- Rys. 101.** Przebieg ciśnienia w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, $p_n = 0,5\text{MPa}$, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające na trzech określonych poziomach.146
- Rys. 102.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,3\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 1, 2, 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$147
- Rys. 103.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,5\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 1, 2, 3\text{s}$ otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$147
- Rys. 104.** Zestawienie gęstości pozornej masy rdzeniowej z bilansu wagowego, podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, $S_{\text{odp}} = 0,45$148
- Rys. 105.** Schemat poboru próbek z zastosowaniem przegród.151
- Rys. 106.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,3\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 2\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$152
- Rys. 107.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,5\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 2\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju $158,7\text{mm}^2$152
- Rys. 108.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,3\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 2\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju $317,4\text{mm}^2$158
- Rys. 109.** Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej w rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 15\text{mm}$, nadciśnienie $p_n = 0,3\text{MPa}$ i podciśnienie $p_p = 0,0\text{MPa}$, czas otwarcia zaworu nadciśnienia $t = 1\text{s}$ czas otwarcia zaworu podciśnienia $t = 3\text{s}$, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie III+IV o łącznym przekroju $317,4\text{mm}^2$158

Spis tabel

Tabela 1. Porównanie parametrów roboczych i cech konstrukcyjnych maszyn dmuchowych [29, 50, 107].	24
Tabela 2. Graficzne zestawienie porównawcze obliczeń symulacyjnych dla ciśnienia strzału (nadcisnienia) 0,3; 0,4; 0,5, przebiegu ciśnień, intensywności narastania ciśnienia w obliczanych komorach oraz prędkość pomiędzy komorami "a", "b", "c", $V_a/V_b = 8$, zawór otwierany wykładniczo.	67
Tabela 3. Graficzne zestawienie porównawcze obliczeń symulacyjnych dla ciśnienia - podciśnienia 0,0; 0,05, przebiegu ciśnień, intensywności narastania ciśnienia w obliczanych komorach oraz prędkość pomiędzy komorami "b", "c", "e", $V_a/V_b = 8$, zawór otwierany wykładniczo.	68
Tabela 6. Zestawienie liczby otworów odpowietrzających oraz powierzchni odpowietrzenia przynależnej do określonego kanału.	90
Tabela 7. Oznaczenie przynależności otworów odpowietrzających do wyznaczonych poziomów zaznaczonych na rys.27 ze wskazaniem na powierzchnię odpowietrzenia rdzennicy.	90
Tabela 8. Parametryzacja stopnia odpowietrzania rdzennicy w zależności od średnicy, powierzchni otworów strzałowych oraz liczby otwartych odpowietrzeń.	91
Tabela 9. Wybrane wartości średniego ciśnienia w komorze $V_b = 3\text{dm}^3$.	94
Tabela 10. Wybrane wartości średniego ciśnienia w rdzennicy $V_c = 0,817\text{dm}^3$ w zależności od ciśnienia roboczego.	94
Tabela 11. Procedura zamykania otworów odpowietrzających.	95
Tabela 12. Ciśnienie strzału 0,3MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 10\text{mm}$.	96
Tabela 13. Ciśnienie strzału 0,3MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 15\text{mm}$.	97
Tabela 14. Ciśnienie strzału 0,3MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 25\text{mm}$.	98
Tabela 15. Wartości średnich gęstości masy uzyskane przy całkowitym odpowietrzeniu rdzennicy wynoszącym $872,8\text{ cm}^2$.	108
Tabela 16. Schemat użycia otworów odpowietrzających przy zastosowaniu poziomów ich usytuowania zilustrowanych na rys. 27.	111
Tabela 17. Stopień odpowietrzenia rdzennicy według zastosowanych poziomów.	112
Tabela 18. Tabela wartości średnich gęstości pozornych w odniesieniu do stopnia odpowietrzenia.	114
Tabela 19. Gęstość pozorna masy w funkcji otworu strzałowego, ciśnienia i stopnia odpowietrzenia.	122
Tabela 20. Zestawienie współczynników zapelnialności rdzennicy w funkcji średnicy zaworu strzałowego i czasu otwarcia zaworu podciśnienia.	129
Tabela 21. Charakterystyka wnęk rdzennic doświadczalnych i systemów ich odpowietrzenia stosowanych w badaniach wpływu strefy odpowietrzeń czynnych na zapelnianie rdzenni [50].	130
Tabela 22. Tabela porównawcza rozkładu gęstości pozornej i pozornej średniej dla klasycznego procesu nadciśnieniowego i procesu zintegrowanego, określone metodą sondowania i wagową.	148
Tabela 23. Rozkład gęstości pozornej w procesie zintegrowanym.	153

Tabela 24. Zestawienie fotogramów końcowej fazy zapelnienia rdzennicy modelowej, nadciśnienie 0,3MPa i podciśnienie 0,0MPa, otwory odpowietrzające otwarte na poziomie IV o łącznym przekroju 158,7mm ² i poziom III+IV o łącznym przekroju 317,4mm ² , czas otwarcia zaworu podciśnienia t = 1, 2, 3s.....	155
Tabela 25. Rozkład gęstości pozornej w sektorach i gęstości średniej.	159

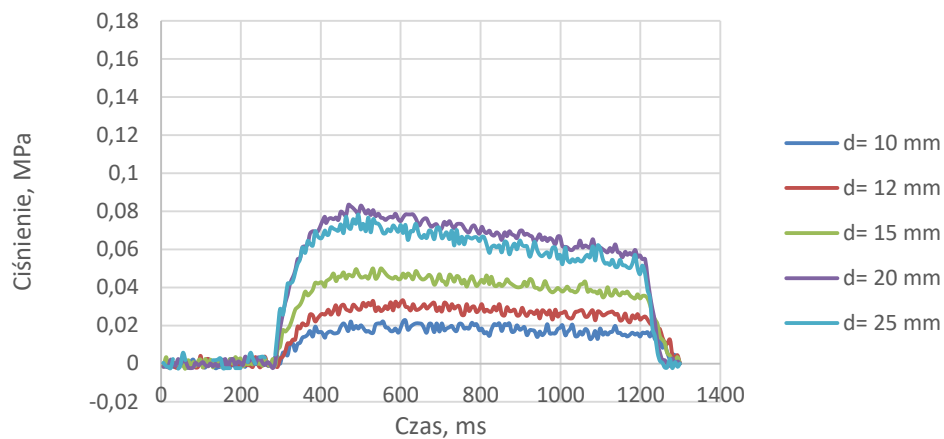
**ALBUM TABEL DANYCH POMIAROWYCH I RYSUNKÓW,
KTÓRYCH PRZYKŁADY OMÓWIONE ZOSTAŁY W
ZASADNICZYM TEKSCIE ROZPRAWY**

Spis treści

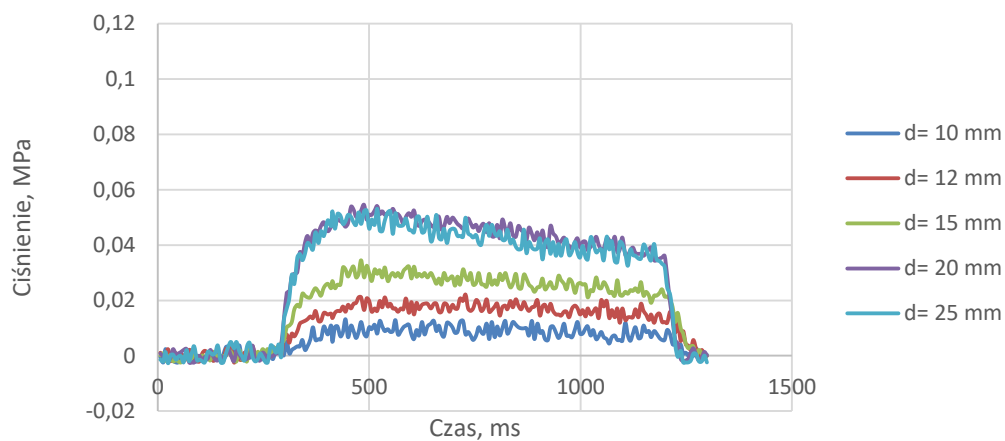
Rys. 14. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla różnych średnic „d” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym 0,3MPa.....	4
Rys. 35. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla różnych średnic „d” strzałowych przy ciśnieniu roboczym 0,4MPa.....	4
Rys. 36. Przebiegi ciśnienia granicznego w rdzennicy dla różnych średnic „d” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym 0,5MPa.....	5
Tabela 13. Ciśnienie strzału 0,4 MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 10$ mm.....	5
Rys. 43. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 10\text{mm}$, ciśnienie strzału 0,4MPa.....	6
Rys. 44. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 10$ mm, ciśnienie strzału 0,4MPa.....	6
Tabela 24. Ciśnienie strzału 0,4MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 15$ mm.....	6
Rys. 25. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 15\text{mm}$, ciśnienie strzału 0,4MPa.....	7
Rys. 36. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 15$ mm, ciśnienie strzału 0,4MPa.....	7
Tabela 15. Ciśnienie strzału 0,4MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 25$ mm.....	7
Rys. 47. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 25\text{mm}$, ciśnienie strzału 0,4MPa.....	8
Rys. 58. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 25$ mm, ciśnienie strzału 0,4MPa.....	8
Tabela 163. Ciśnienie strzału 0,5MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 10$ mm.....	8
Rys. 49. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 10\text{mm}$, ciśnienie strzału 0,5MPa.....	9
Rys. 50. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 10$ mm, ciśnienie strzału 0,5MPa.....	9
Tabela 17. Ciśnienie strzału 0,5MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 15$ mm.....	9
Rys. 51. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 15\text{mm}$, ciśnienie strzału 0,5MPa.....	10
Rys. 52. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 15$ mm, ciśnienie strzału 0,5MPa.....	10
Tabela 18 Ciśnienie strzału 0,5MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 25$ mm.....	10
Rys. 53. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 25$ mm, ciśnienie strzału 0,5MPa.....	11
Rys. 54. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 25$ mm, ciśnienie strzału 0,5MPa.....	11
Rys. 64. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=15\text{mm}$, $p = 0,3\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń.....	12
Rys.65. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=15\text{mm}$, $p = 0,4\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń.....	12

Rys. 66. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=15\text{mm}$, $p = 0,5\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowiedź.....	13
Rys.67. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=25\text{mm}$, $p = 0,5\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowiedź.....	13
Rys. 68. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=25\text{mm}$, $p = 0,4\text{MPa}$, wyznaczony dla różnych poziomów odpowiedź.....	14
Rys.69. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=25\text{mm}$, $p = 0,5\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowiedź.....	14

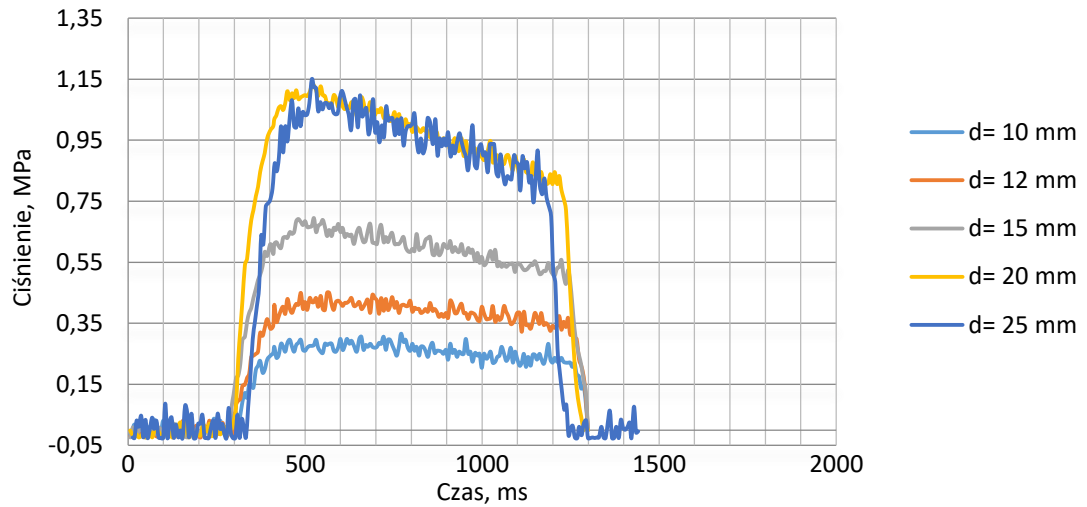
Część 1. Kontynuacja zbioru charakterystyk zmienności ciśnień granicznych powietrza w komorze naboowej i rdzennicy dla ciśnienia roboczego 0.3-0.5MPa.



Rys. 64. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla różnych średnic „ d ” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym 0,3MPa



Rys. 35. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla różnych średnic „ d ” strzałowych przy ciśnieniu roboczym 0,4MPa

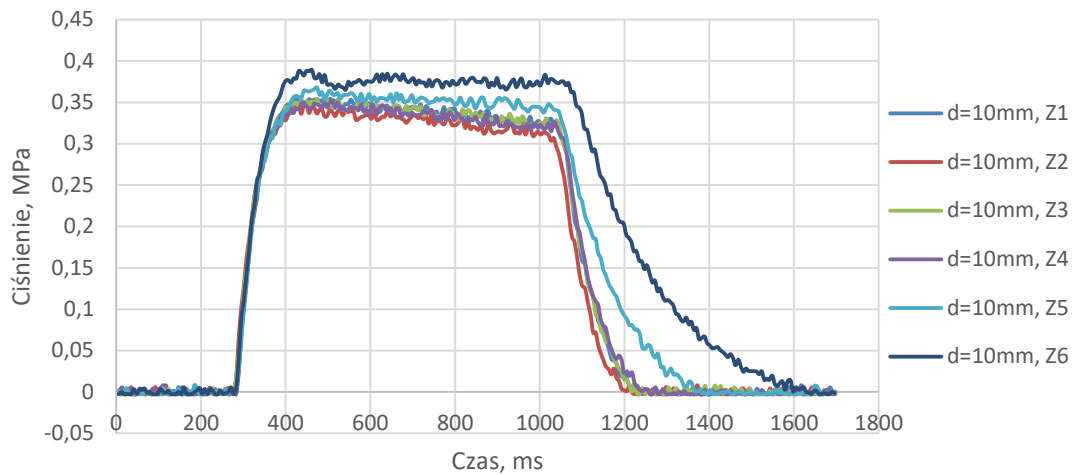


Rys. 36. Przebiegi ciśnienia granicznego w rdzennicy dla różnych średnic „d” otworów strzałowych przy ciśnieniu roboczym 0,5MPa

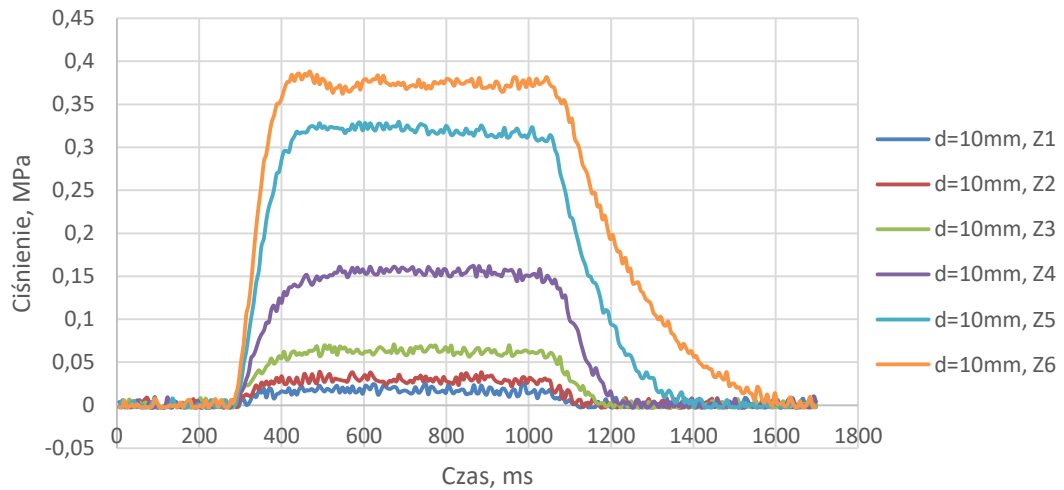
Część 2. Kontynuacja zbioru charakterystyk dla ciśnienia 0,4 i 0.5MPa z zastosowanymi otworami strzałowymi $d = 10 - 25$ mm, na których krzywe reprezentują wartości stopnia odpowietrzenia dla poszczególnych oznaczeń **Z1 do Z6** wg. schematu w tabeli 9.

Tabela 43. Ciśnienie strzału 0,4MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 10$ mm

Średnica i powierzchnia otworu strzałowego $d = 10$ mm $\sum f_1 = 78,54$ mm ²						
Otwory odpowietrzające	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Stopień odpowietrzenia	11,11	9,09	5,05	3,03	4,07	1,01
Powierzchnia otworów odpowietrzających [mm ²]	872,8	713,7	555	396,3	238	79,3



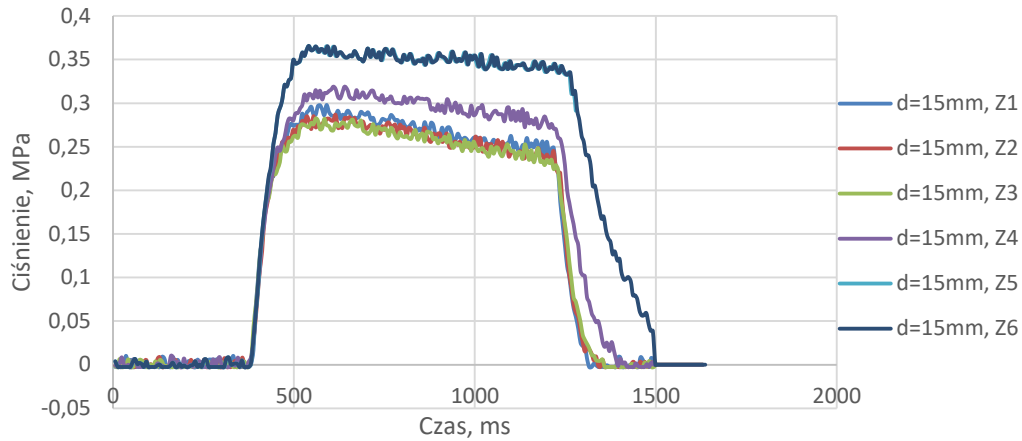
Rys. 43. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 10 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,4 \text{ MPa}$.



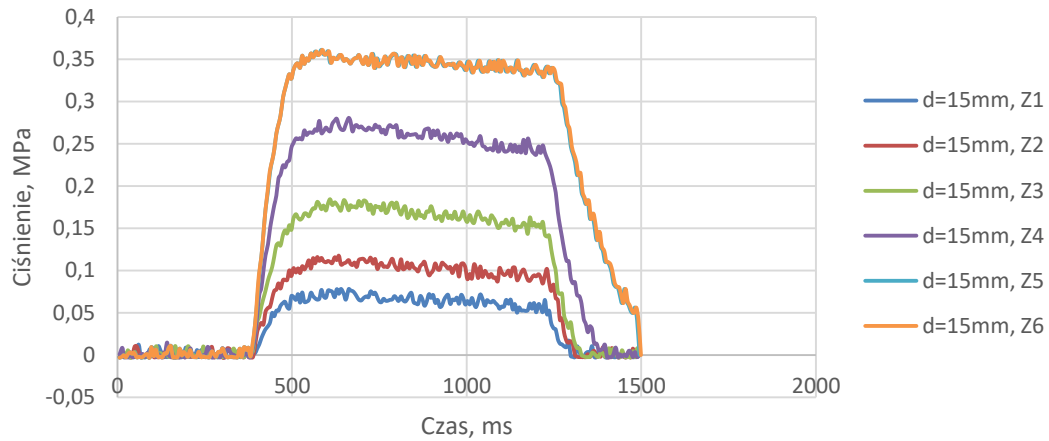
Rys. 44. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 10 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,4 \text{ MPa}$.

Tabela 54. Ciśnienie strzału $0,4 \text{ MPa}$, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 15 \text{ mm}$

Średnica i powierzchnia otworu strzałowego $d = 15 \text{ mm}$ $\sum f_1 = 176,71 \text{ mm}^2$						
Otwory odpowietrzające	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Stopień odpowietrzenia	4,94	4,04	3,14	2,24	1,35	0,45
Powierzchnia otworów odpowietrzających [mm^2]	872,8	713,7	555	396,3	238	79,3



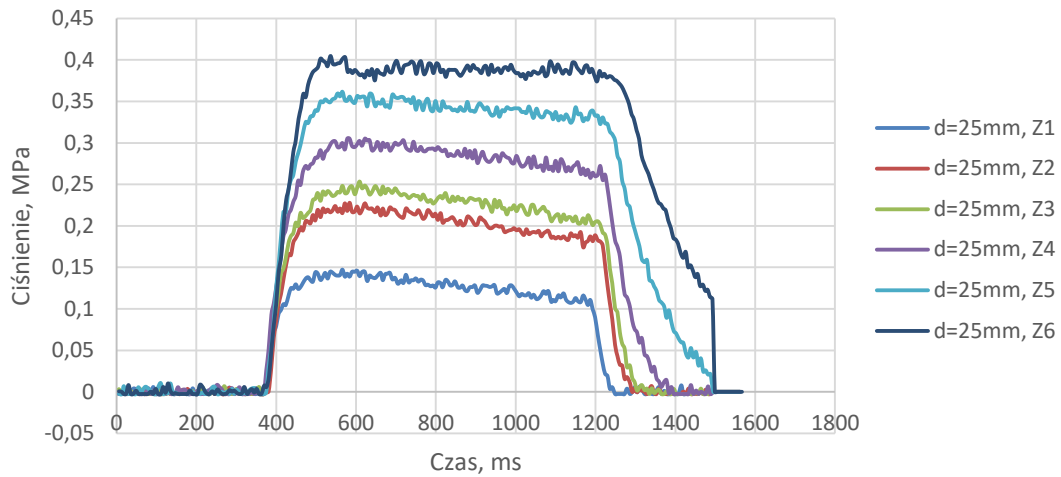
Rys. 75. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 15 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,4 \text{ MPa}$,



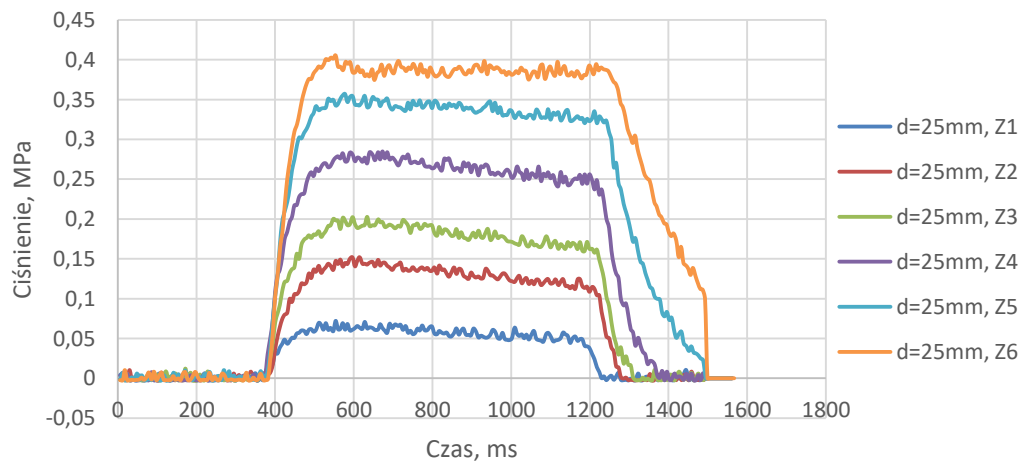
Rys. 86. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 15 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,4 \text{ MPa}$,

Tabela 15. Ciśnienie strzału $0,4 \text{ MPa}$, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 25 \text{ mm}$

Średnica i powierzchnia otworu strzałowego $d = 25 \text{ mm}$ $\sum f_1 = 490,87 \text{ mm}^2$						
Otworki odpowietrzające	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Stopień odpowietrzenia	1,78	1,45	1,13	0,81	0,48	0,16
Powierzchnia otworów odpowietrzających [mm^2]	872,8	713,7	555	396,3	238	79,3



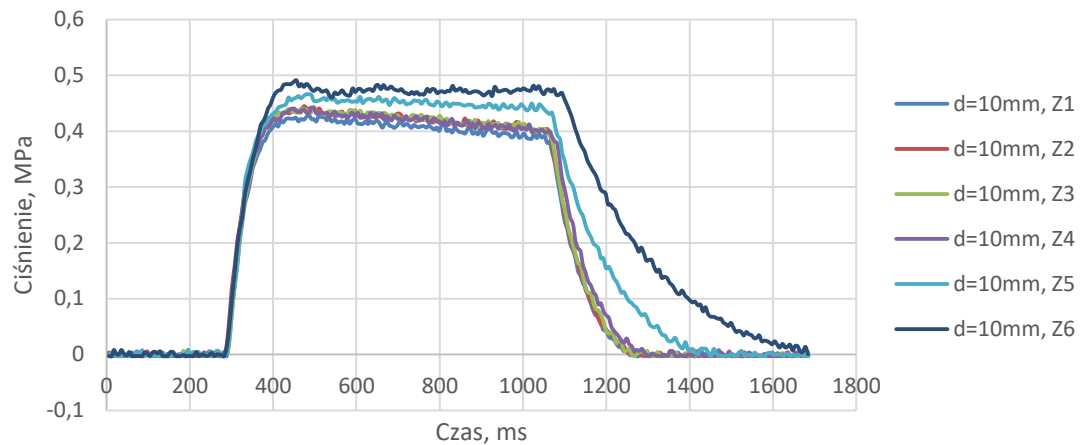
Rys. 97. Przebiegi ciśnienia w komorze nabojojowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 25 \text{ mm}$, ciśnienie strzału 0,4MPa.



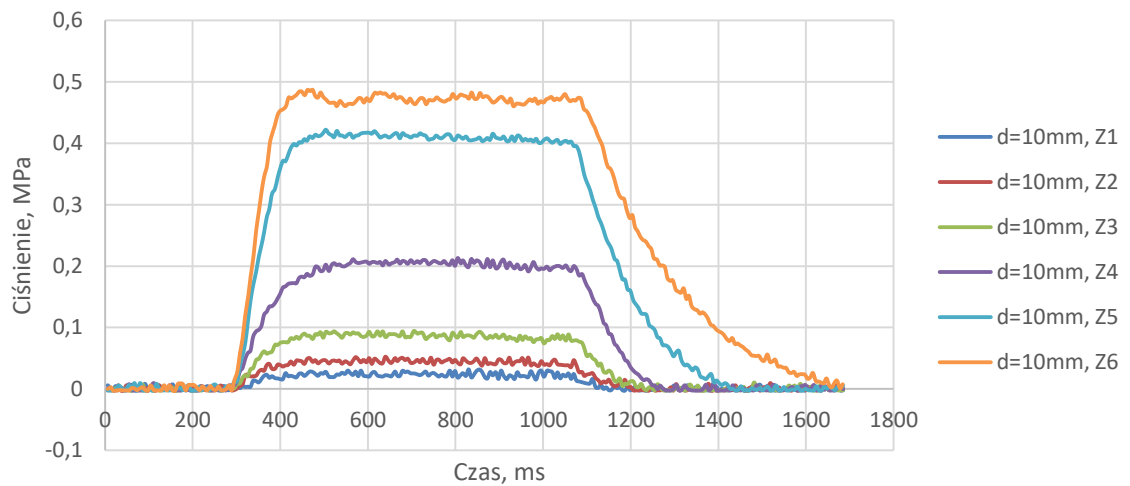
Rys. 108. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 25 \text{ mm}$, ciśnienie strzału 0,4MPa,

Tabela 166. Ciśnienie strzału 0,5MPa, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu strzałowego $d = 10 \text{ mm}$

Średnica i powierzchnia otworu strzałowego $d = 10 \text{ mm}$ $\sum f_1 = 78,54 \text{ mm}^2$						
Otwory odpowietrzające	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Stopień odpowietrzenia	11,11	9,09	5,05	3,03	4,07	1,01
Powierzchnia otworów odpowietrzających [mm^2]	872,8	713,7	555	396,3	238	79,3



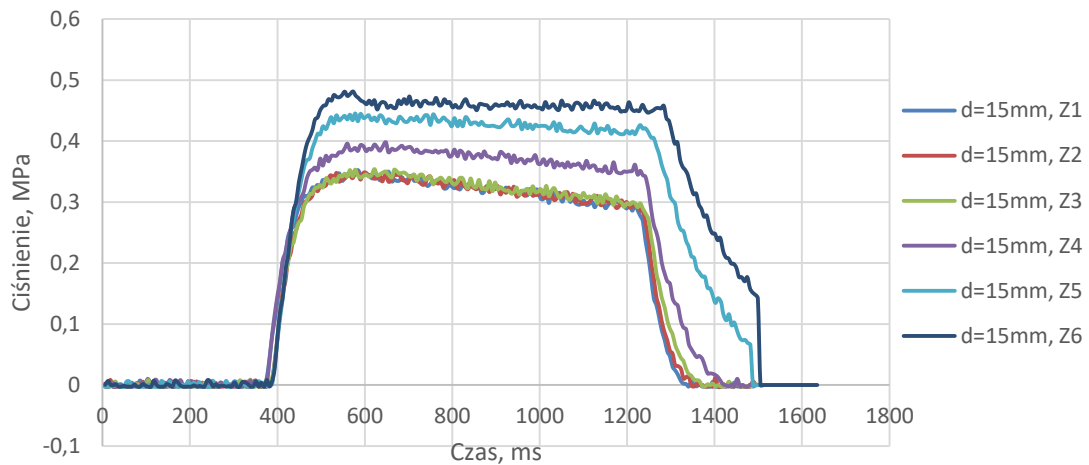
Rys. 49. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 10 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,5 \text{ MPa}$.



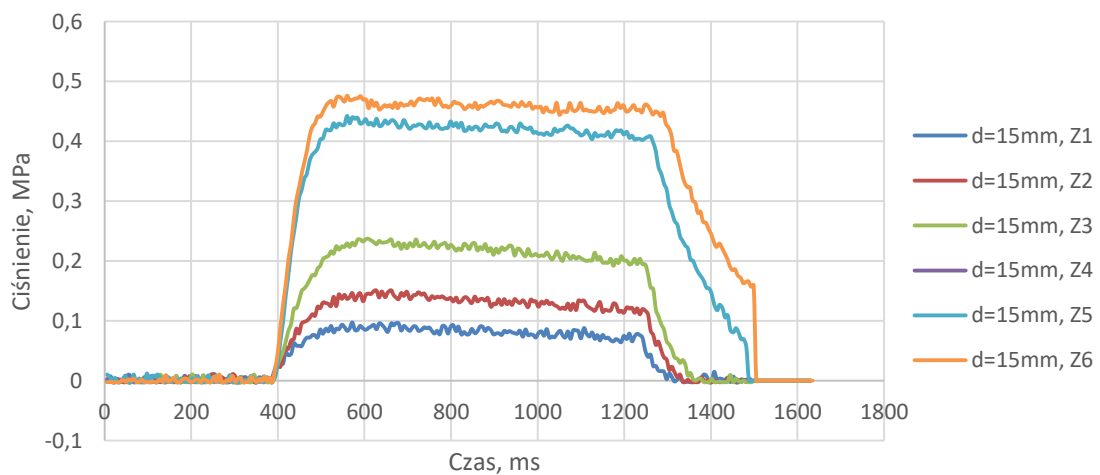
Rys. 50. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 10 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,5 \text{ MPa}$.

Tabela 17. Ciśnienie strzału $0,5 \text{ MPa}$, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 15 \text{ mm}$

Średnica i powierzchnia otworu strzałowego $d = 15 \text{ mm}$ $\sum f_1 = 176,71 \text{ mm}^2$						
Otwory odpowietrzające	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Stopień odpowietrzenia	4,94	4,04	3,14	2,24	1,35	0,45
Powierzchnia otworów odpowietrzających [mm^2]	872,8	713,7	555	396,3	238	79,3



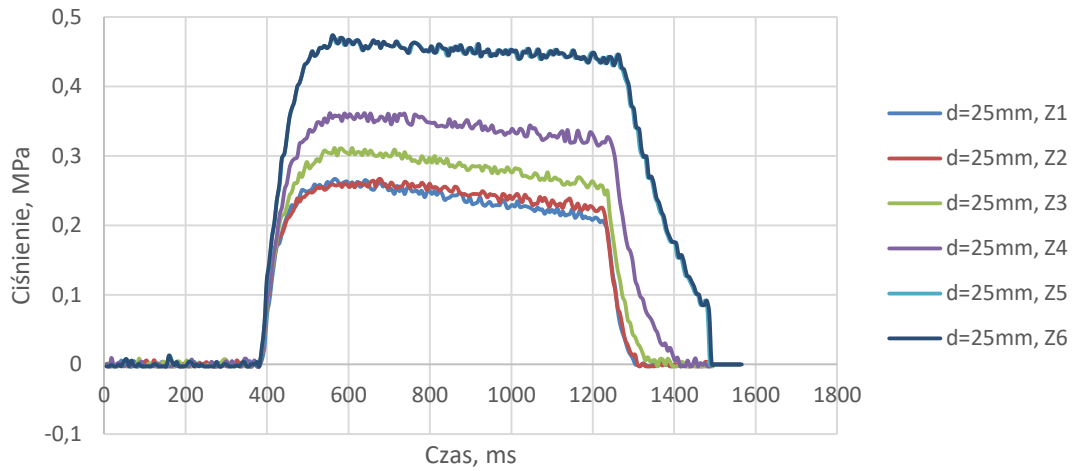
Rys. 51. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 15\text{mm}$, ciśnienie strzału $0,5\text{MPa}$,



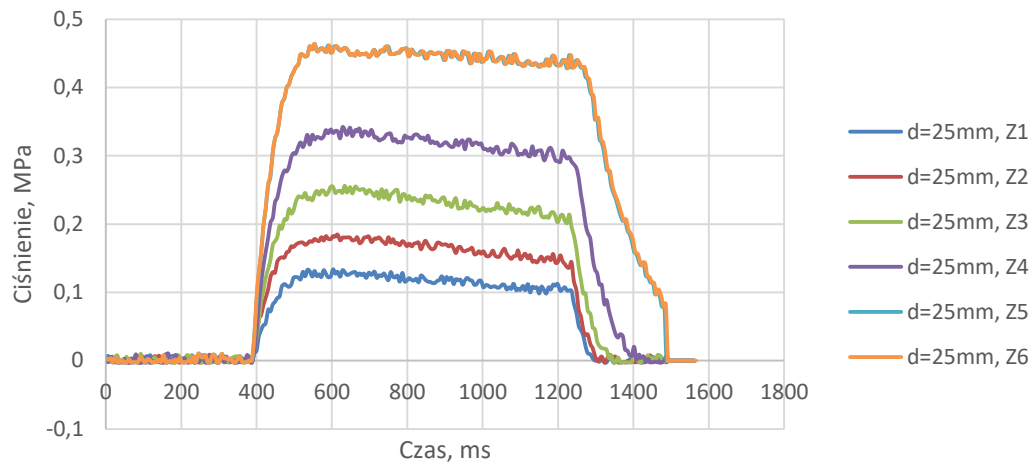
Rys. 52. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 15\text{mm}$, ciśnienie strzału $0,5\text{MPa}$.

Tabela 18 Ciśnienie strzału $0,5\text{MPa}$, stopień odpowietrzenia rdzennicy dla otworu $d = 25\text{mm}$

Średnica i powierzchnia otworu strzałowego $d = 25 \text{ mm}$ $\sum f_1 = 490,87 \text{ mm}^2$						
Otwory odpowietrzające	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Stopień odpowietrzenia	1,78	1,45	1,13	0,81	0,48	0,16
Powierzchnia otworów odpowietrzających [mm^2]	872,8	713,7	555	396,3	238	79,3



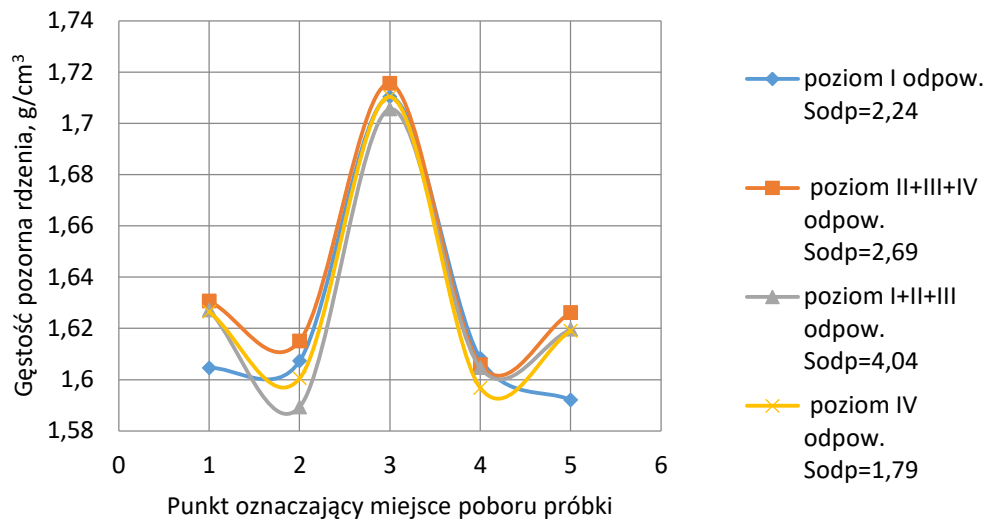
Rys. 53. Przebiegi ciśnienia w komorze naboowej $V_b = 3 \text{ dm}^3$ dla średnicy $d = 25 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,5 \text{ MPa}$.



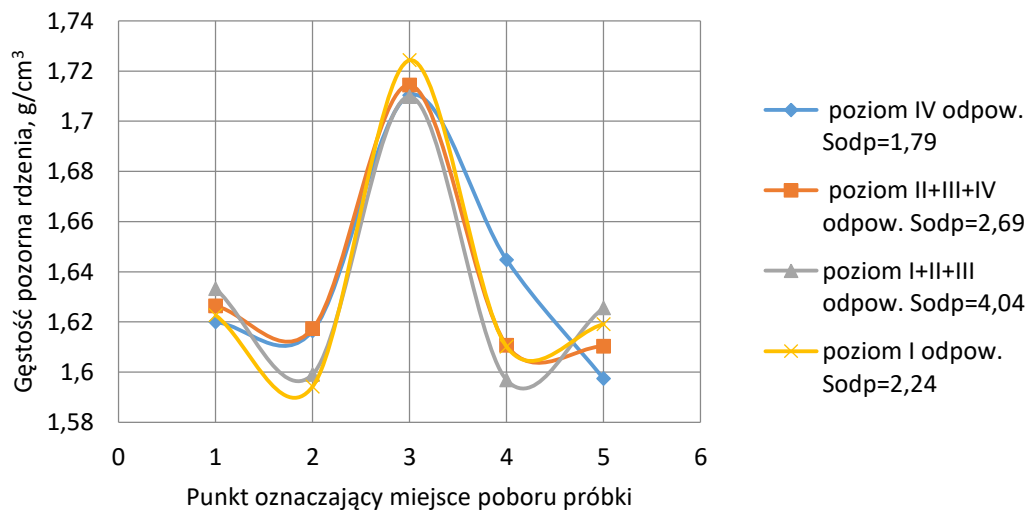
Rys. 54. Przebiegi ciśnienia w rdzennicy dla średnicy $d = 25 \text{ mm}$, ciśnienie strzału $0,5 \text{ MPa}$,

Część 3. Kontynuacja zbioru charakterystyk dla ciśnienia $0,4$ i $0,5 \text{ MPa}$ z zastosowanymi otworami strzałowymi $d = 10 - 25 \text{ mm}$, na których krzywe reprezentują wartości stopnia odpowietrzenia dla poszczególnych oznaczeń **Z1 do Z6** wg. schematu w tabeli 9.

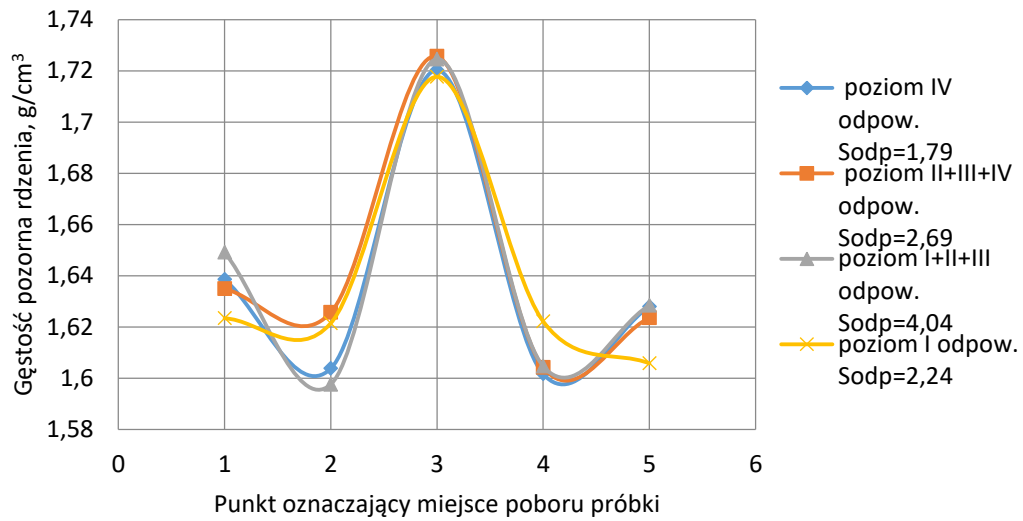
- ciśnienie zmieniane stopniowo $0,3; 0,4; 0,5 \text{ MPa}$, otwór strzałowy $d = 15 \text{ mm}$ z zastosowaniem poziomego odpowietrzenia zgodnie z tabelą 21 oraz rys.30.



Rys. 64. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=15\text{mm}$, $p = 0,3\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń.

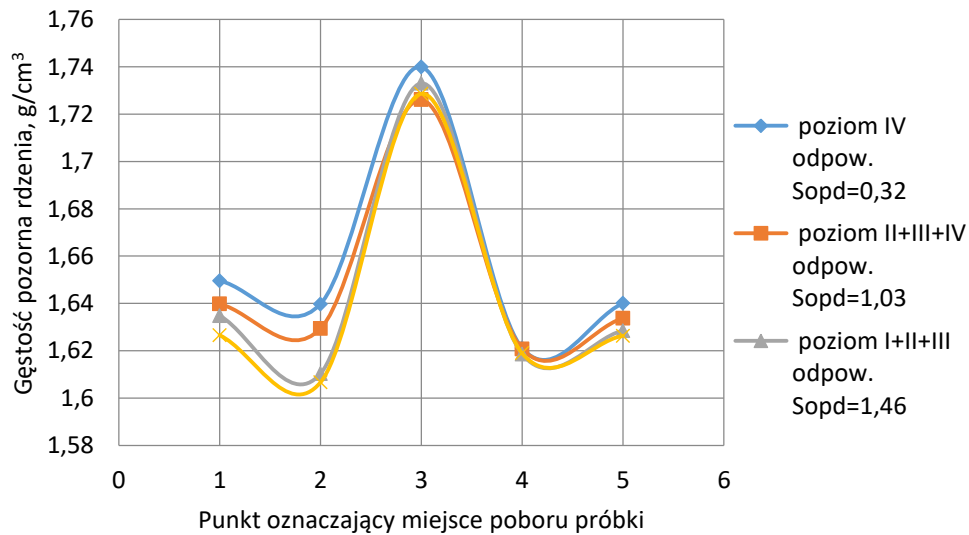


Rys.65. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=15\text{mm}$, $p = 0,4\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń.

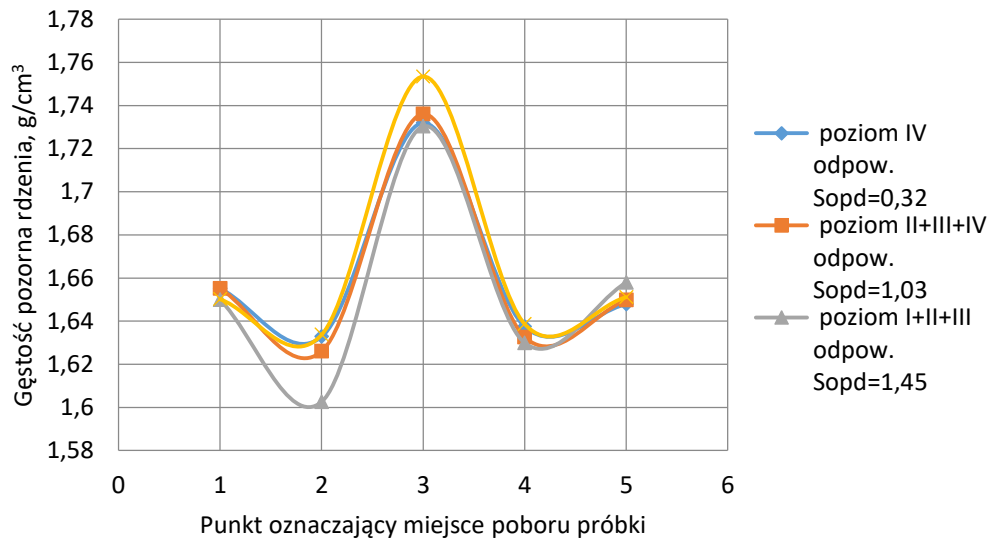


Rys. 66. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=15\text{mm}$, $p = 0,5\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń.

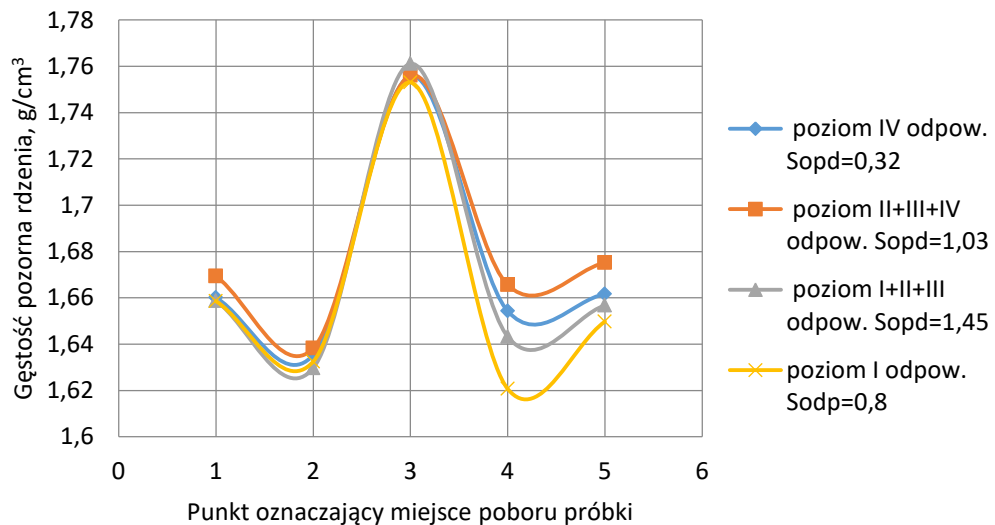
- ciśnienie zmieniane stopniowo 0,3; 0,4; 0,5 MPa, otwór strzałowy $d = 25\text{mm}$ z zastosowaniem poziomu odpowietrzenia zgodnie z tabelą 21 oraz rys.30.



Rys.67. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=25\text{mm}$, $p = 0,5\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń.



Rys. 68. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=25\text{mm}$, $p = 0,4\text{MPa}$, wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń.



Rys.69. Rozkład gęstości pozornej masy rdzeniowej dla otworu strzałowego $d=25\text{mm}$, $p = 0,5\text{MPa}$ wyznaczony dla różnych poziomów odpowietrzeń.

Wartości średnie gęstości pozornej dla zadanych parametrów wstrzeliwania; średnica otworu strzałowego, nadciśnienie, stopień odpowietrzenia, uzyskano z badań zgodnie z założonymi parametrami procesowymi. Średnią wartość rozkładu gęstości pozornej z pobranych próbek masy rdzeniowej przedstawiono w pracy tabela 23.