

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA.....	11
1. WSTĘP	15
2. POWIETRZE WILGOTNE.....	20
2.1. Opis termodynamiczny	20
2.2. Skraplanie i odparowanie pary wodnej w powietrzu wilgotnym	23
2.3. Ekspansja powietrza wilgotnego – przepływ okołodźwiękowy	27
2.3.1. Podstawowe parametry przepływowe powietrza wilgotnego	30
2.3.2. Diabatyyczny przepływ powietrza wilgotnego	34
3. METODY NUMERYCZNE.....	37
3.1. Metoda URANS	38
3.1.1. Podstawowe równania zachowania.....	39
3.1.2. Model turbulencji	42
3.1.3. Model kondensacji homogenicznej.....	44
3.1.4. Model kondensacji heterogenicznej.....	50
3.2. Metoda LES.....	52
3.3. Warunki brzegowe	56
3.4. Algorytm numeryczny.....	57
3.4.1. Zagadnienie Riemanna.....	58
3.4.2. Schemat jawny Rungego-Kutty	59
3.5. Fale ciśnieniowe.....	60
3.5.1. Fala kondensacji.....	61
3.5.2. Fala uderzeniowa	63
3.5.3. Pozostałe fale ciśnieniowe	65
3.6. Obliczenia walidacyjne	68
3.6.1. Walidacja przepływu transonicznego z prostopadłą falą uderzeniową.....	68
3.6.2. Walidacja modelu kondensacji pary wodnej.....	71

4. METODY EKSPERYMENTALNE.....	77
4.1. Instalacja badawcza.....	77
4.2. Geometrie pomiarowe	80
4.3. System pomiarowy	82
4.3.1. Parametry powietrza i pozostałe parametry procesowe	87
4.3.2. Pomiar ciśnienia statycznego	88
4.3.3. Wizualizacja pola przepływu	90
5. ANALIZA PROCESU KONDENSACJI PARY WODNEJ	93
5.1. Identyfikacja procesu kondensacji – analiza jakościowa.....	93
5.1.1. Dysza „butelkowa”.....	94
5.1.2. Dysza kołowa	97
5.2. Analiza ilościowa	101
6. ANALIZA PROCESU ODPAROWANIA FAZY CIEKŁEJ NA FALI UDERZENIOWEJ.....	106
7. WPŁYW PRZECIWCISNIENIA W DYSZY NA OBRAZ POŁA PREPŁYWU.....	109
7.1. Dysza kołowa	110
7.2. Dysza „butelkowa”.....	112
7.3. Interakcja prostopadłej fali uderzeniowej z falą kondensacji	113
8. WPŁYW ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA NA PROCES KONDENSACJI .	115
8.1. Wpływ wilgotności względnej na zjawisko kondensacji	117
8.2. Efekt kondensacji heterogenicznej.....	121
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	124
BIBLIOGRAFIA	126
Streszczenie.....	131

CONTENTS

PREFACE	11
1. INTRODUCTION	15
2. MOIST AIR	20
2.1. Thermodynamic description	20
2.2. Water vapour condensation and evaporation in moist air	23
2.3. Moist air expansion – transonic flow.....	27
2.3.1. Moist air basic flow parameters	30
2.3.2. Moist air diabatic flow.....	34
3. NUMERICAL METHOD.....	37
3.1. URANS method.....	38
3.1.1. Basic conservation equations	39
3.1.2. Turbulence model.....	42
3.1.3. Homogenous condensation model.....	44
3.1.4. Heterogeneous condensation model	50
3.2. LES method	52
3.3. Boundary conditions.....	56
3.4. Numerical algorithm.....	57
3.4.1. Riemann problem	58
3.4.2. Runge-Kutta explicit scheme	59
3.5. Pressure waves.....	60
3.5.1. Condensation wave.....	61
3.5.2. Shock wave.....	63
3.5.3. Other pressure waves.....	65
3.6. Validation calculations	68
3.6.1. Validation of the transonic flow with normal shock wave.....	68
3.6.2. Validation of the water vapour condensation model.....	71

4. EXPERIMENTAL METHODS	77
4.1. Experimental facility	77
4.2. Measuring geometries.....	80
4.3. Measuring system	82
4.3.1. Parameters of air and other process parameters	87
4.3.2. Static pressure measurement	88
4.3.3. Flow field visualization	90
5. ANALYSIS OF THE WATER VAPOUR CONDENSATION PROCESS	93
5.1. Condensation process identification – qualitative analysis	93
5.1.1. “Bottleneck” nozzle.....	94
5.1.2. Arc nozzle.....	97
5.2. Quantitative analysis.....	101
6. ANALYSIS OF THE LIQUID PHASE EVAPORATION ON THE SHOCK WAVE	106
7. IMPACT OF THE NOZZLE BACK PRESSURE ON THE FLOW FIELD IMAGE	109
7.1. Arc nozzle.....	110
7.2. “Bottleneck” nozzle.....	112
7.3. Interaction between the normal shock wave and the condensation wave	113
8. IMPACT OF AIR POLLUTANTS ON THE CONDENSATION PROCESS.....	115
8.1. Impact of the relative air humidity on the condensation process	117
8.2. Heterogeneous condensation effect	121
9. SUMMARY AND CONCLUSIONS	124
BIBLIOGRAPHY	126
Abstract	132