

Abstract

This dissertation mainly concerns experimental model tests and the subject of active ventilation in urbanized areas. The main purpose of the work was to answer the question whether it is possible to model the inversion layer of the atmosphere with sufficient accuracy and the active ventilation system aimed at a quick improvement of air-sanitary conditions.

The progressing degradation of the natural environment of urbanized areas is an indicator of our times, our civilization. Improving the air-sanitary conditions of these areas should therefore be a primary and priority action undertaken by the relevant government and local government institutions, universities, and research and development institutions.

The basic action in this subject is and should be a radical reduction in the emission of municipal and transport pollutants. Taking into account the development of e.g. the Krakow agglomeration and the increase in its inhabitants, as well as the moderate achievements to date in improving air quality, actions taken only in the field of reducing pollutant emissions will certainly not be sufficient. They will have to be supported by other activities, especially dynamic ventilation carried out in horizontal ventilation ducts by series-parallel systems of special towers ventilation units cooperating with vertical ventilation chimneys.

The main author of the first concept of such solutions for active ventilation and smog reduction in urban areas, as well as the similarity criteria for these issues in model research, is prof. Andrzej Flaga.

Pioneering, preliminary model tests in this area were carried out in the Wind Engineering Laboratory of the Cracow University of Technology (LIW PK) by the team of: Prof. DSc Eng. Andrzej Flaga - team leader; MSc. Eng. Piotr Krajewski; MSc. Eng. Aleksander Pistol and Dr. Eng. Arch. Łukasz Flaga.

These issues were presented at 3 conferences:

1. 8th International Conference on Environmental Effects on Buildings and People: Actions, Influences, Interactions, Discomfort, (EEBP VIII), October 2018, Cracow-Tyniec, Poland
2. Dynamiczne przewietrzanie i redukcja smogu obszarów zurbanizowanych ze szczególnym uwzględnieniem miasta Krakowa, Politechnika Krakowska, September 2019, Cracow, Poland
3. Dynamiczne przewietrzanie i redukcja smogu obszarów zurbanizowanych, , Politechnika Krakowska, 2021, Cracow, Poland

The results of the work were published in the articles:

Krajewski P.: *Badania modelowe dynamicznego działania na warstwę przyziemną atmosfery; Wpływy środowiskowe na budowie i ludzi*; red. Ł. Flaga, R. Kłaput, Politechnika Krakowska, Kraków, 2022

Flaga Ł., Pistol A., Krajewski P., Flaga A.: *Model tests of dynamic action on the atmospheric boundary layer – linear configuration of ventilation towers on a rough terrain*; Environmental Effects on Buildings and People: Actions, Influences, Interactions, Discomfort, EEBP VIII, Cracow-Lublin 2018, Poland;

Krajewski P., Pistol A., Flaga Ł., Flaga A.: *Model tests of dynamic action on the atmospheric boundary layer – vertical ventilation towers of urban areas*; Environmental Effects on Buildings and People: Actions, Influences, Interactions, Discomfort, EEBP VIII, Cracow-Lublin 2018, Poland;

Pistol A., Krajewski P., Flaga Ł., Flaga A.: *Model tests of dynamic action on the atmospheric boundary layer – concentric configuration of ventilation towers with central ventilation chimney*; Environmental Effects on Buildings and People: Actions, Influences, Interactions, Discomfort, EEBP VIII, Cracow-Lublin 2018, Poland;

Krajewski P., Pistol A., Flaga Ł., Flaga A.: *Badania modelowe dynamicznego działania na warstwę przyziemną atmosfery – efektywność różnych typów kominów wentylacyjnych*; Dynamiczne przewietrzanie i redukcja smogu obszarów zurbanizowanych, , Politechnika Krakowska, Kraków 2021.

The following monograph is also devoted to these issues:

„Wpływy środowiskowe na budowlę i ludzi, Jubileusz 70-lecia Profesora Andrzeja Flagi i jego szkoła naukowa”; red. Ł. Flaga, R. Kłaput, Politechnika Krakowska, Kraków, 2022.

It is also worth noting that the solutions for active ventilation systems for urban areas developed by the LIW PK team have been covered by two patents:

1. WIPOST 10/C PL 424786: System do wymuszania ruchów mas powietrza nad otwartymi obszarami.
2. WIPOST 10/C PL 424785: System do wymuszania ruchów mas powietrza nad otwartymi obszarami, zwłaszcza wzbudzenia i podtrzymania strugi powietrza nad otwartymi obszarami zurbanizowanymi.

Four stages of unique, pioneering studies on the subject have been carried out. The first three stages of this research are presented in the research reports:

1. Report 1: Flaga A., Flaga Ł., Krajewski P., A. Pistol: *Badania wstępne możliwości dynamicznego oddziaływania na warstwę przyziemną. Etap 1: Pomiar pola prędkości przepływu i zasięgu strumienia powietrza generowanego przez modele wentylatorów/wież wentylacyjnych w różnych wariantach ich konfiguracji*; Research Report, Wind Engineering Laboratory, Cracow University of Technology, Cracow 2017;
2. Report 2: A. Flaga, Ł. Flaga, P. Krajewski, A. Pistol, *Badania wstępne możliwości dynamicznego oddziaływania na warstwę przyziemną. ETAP II – Badania w tunelu aerodynamicznym pola prędkości przepływu generowanego przez układ wentylatorów/wież wentylacyjnych w konfiguracji promienistej i specjalny membranowy komin wentylacyjny*; Research Report, Wind Engineering Laboratory, Cracow University of Technology, Cracow 2017;

3. Report 3: A. Flaga, Ł. Flaga, P. Krajewski, A. Pistol, *Badania wstępne możliwości dynamicznego oddziaływania na warstwę przyziemną. Etap III – Badania w tunelu aerodynamicznym wybranych zagadnień z Etapów I i II przy uwzględnieniu wpływu chropowatości podłoża (zabudowy miejskiej)*; Cracow University of Technology, Cracow 2018;

The fourth stage of this research was carried out experimentally by the author, and the theoretical foundations and similarity criteria for this research were developed mainly by prof. Andrzej Flaga.

This doctoral thesis describes all the research and issues covered by all four stages of this work.

Based on the results obtained at the time, the concept of further stages, initial assumptions, or directions of development changed in the course and was improved during the progress of the research. The work presents the next stages of research, initial assumptions, physical and theoretical models so that the reader can understand how the concept has changed and which factors influenced its development.

The phenomenon of smog formation is an urgent problem for most Polish cities, and only expensive, long-term solutions are proposed, which are primarily a burden on the budget of the residents. The construction of the examined city ventilation system would make it possible to temporarily, quickly, and significantly improve the air-sanitary conditions in many cities.

In the first chapter, theses of the doctoral dissertation were formulated:

1. It is possible to dynamically act on the ground level layer of air in urbanized areas by using vertical ventilation systems cooperating with the radial horizontal system of ventilation ducts that effectively improve the aerosanitary conditions of these areas.
2. The model of vertical ventilation systems cooperating with the radial horizontal system used in wind model tests imitates this phenomenon with sufficient accuracy for engineering practice.

The second chapter contains a description of the motivation for writing the following work and the initial concept that initiated the research. The main purpose of the research was to enable the construction of an active city ventilation system, which would be located in naturally occurring ventilation ducts and would serve for quick, ad hoc ventilation of the urban area in the event of wind calm or the phenomenon of atmospheric temperature inversion.

The third chapter is a study on the subject of smog. It describes three types of smog: - two commonly known, i.e. winter smog (acid, London) and summer smog (photochemical, Los Angeles type), and the third - Polish smog. Polish smog is characterized by high acidity, just like winter smog, but it contains much larger amounts of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁.

The fourth chapter describes the phenomenon of temperature inversion in the atmosphere. Temperature inversion is an anomaly that blocks natural convection and thus the ability to remove pollutants generated by an urbanized area (mainly the so-called low-emissions). The particular equilibrium states of the atmosphere and thus the conditions conducive to the formation of the blocking layer are described. Next, the focus was on the time frame of inversion occurrence - from a daily inversion to a multi-day inversion caused, for example, by a change in the atmospheric front. Further, the formation of inversion layers is described in detail in the example of the city of Krakow. The last point of the chapter focuses on the height of the inversion layer, its thickness and the time of its occurrence in a year.

The fifth chapter contains a description of the concept of an active ventilation system, a description of ventilation towers, chimneys, their potential location in natural ventilation ducts and cooperation in the series of ventilation towers. The similarity criteria for model studies, the adopted similarity scales and the theoretical model were also presented.

The sixth chapter focuses on the horizontal ventilation system aimed at creating an artificial air stream enabling the transport of pollutants outside the city along the existing natural ventilation channels. The first tests that were carried out for models of fans were also described to determine the velocity field of the stream generated by a single tower. Then, the tests carried out in the further stages of the tests were described, but also those related to horizontal ventilation, i.e. taking into account the influence of the substrate roughness. The research results and their analysis are presented at the end of the chapter.

The seventh chapter describes the concept of a vertical ventilation chimney designed to eject masses of polluted air above the inversion layer. A physical and theoretical model of the phenomenon and criteria and similarity scales were proposed.

The eighth chapter contains a description of research on vertical ventilation, the experimental model built, the adopted various shapes of the chimney shell, the method of covering the lower spaces, the effect of shortening the chimney jacket and changing the angles of the fans at the base of the chimney. Smoke visualization was also described. The chapter presents the results of the research and their analysis.

The ninth chapter concerns the possibility of modeling the inversion layer in laboratory conditions and checking at which parameters the system is able to penetrate the layer. The adopted theoretical model of the phenomenon and the physical model was also presented. It was proposed to replace the resistance of the inversion layer with a mesh system. Next, the influence of the external fan ring on the operation of the ventilation chimney was checked. Velocity distribution for the air stream generated by the chimney for various input parameters was determined. Based on the obtained results, an analyze and conclusions were carried out. The method of smoke visualization was also shown and described.

Chapter ten contains general conclusions from the entire doctoral thesis.

Chapter eleven describes further directions of development and the necessary research, development of the concept and the way to the final implementation of the project.

The last chapter contains the bibliography used in the work.

Keywords: wind engineering, model test research, active ventilation of cities, horizontal and vertical urban ventilation system, penetration of the inversion layer, smog

Szczegółowe streszczenie w języku polskim (Extended abstract in Polish)

Praca ma charakter przede wszystkim eksperymentalny i dotyczy tematyki aktywnego przewietrzania terenów zurbanizowanych. Podstawowym celem pracy było odpowiedzenie na pytanie czy możliwe jest zamodelowanie z wystarczającą dokładnością warstwy inwersyjnej atmosfery oraz aktywnego systemu wentylacyjnego mającego na celu szybką poprawę warunków aerosanitarnych.

Podczas badań nad kolejnymi etapami pracy, na podstawie otrzymanych wyników koncepcja co do dalszych etapów, przyjętych założeń początkowych czy kierunków rozwoju zmieniała się w trakcie i była udoskonalana w trakcie postępów badań. W pracy przedstawiono kolejne etapy badań zachowując ówczesne podejście, założenia początkowe, modele fizyczne i teoretyczne tak aby czytelnik mógł zrozumieć w jaki sposób koncepcja się zmieniała i, które czynniki miały wpływ na jej rozwój. Badania wykonywane w kolejnych etapach dotyczyły zarówno systemu wentylacji poziomej jak i pionowej. W celu lepszej czytelności i zrozumienia, badania z różnych etapów zostały rozdzielone tak, aby wentylację poziomą i pionową przedstawić w dwóch osobnych rozdziałach.

Zjawisko powstawania smogu jest nagłym problem większości polskich miast a proponowane są jedynie rozwiązania długofalowe, bardzo kosztowne i obciążające przede wszystkim mieszkańców. Budowa badanego systemu przewietrzania miast pozwoliłaby doraźnie, szybko i znacząco poprawić warunki aerosanitarnie w wielu miastach, szczególnie tych, których topografia naturalnie stwarza warunki sprzyjające powstawaniu warstwy inwersji a co za tym idzie – smogu.

W rozdziale pierwszym sformułowane zostały tezy pracy doktorskiej:

1. Możliwe jest dynamiczne oddziaływanie na przyziemne warstwy powietrza na terenach zurbanizowanych poprzez zastosowanie systemów wentylacji pionowej współpracujących z promienistym poziomym układem kanałów wentylacyjnych, które skutecznie poprawiają warunki aerosanitarnie tych terenów.
2. Model pionowych układów wentylacyjnych współpracujących z promienistym poziomym układem kanałów wentylacyjnych wykorzystanych w badaniach modelowych w tunelu aerodynamicznym odwzorowuje to zjawisko z wystarczającą dokładnością dla praktyki inżynierskiej.

Rozdział drugi zawiera opis motywacji napisania poniższej pracy oraz początkowej koncepcji, jaka zapoczątkowała badania. Głównym celem badań było umożliwienie budowy aktywnego systemu przewietrzania miast, który by był umiejscowiony w naturalnie występujących kanałach wentylacyjnych i służyłby szybkiej, doraźnej wentylacji terenu zurbanizowanego w przypadku wystąpienia ciszy wiatrowej czy zjawiska inwersji temperatury atmosfery. Ponieważ dalej wiele gospodarstw domowych w Polsce ogrzewanych jest za pomocą wysokoemisyjnych i niskowydajnych źródeł ciepła opalanych głównie węglem problem powstawania epizodów smogowych jest powszechny i nasila się w okresie jesienno-zimowym. Proponowane dotychczas rozwiązania skupiały