

DOI: 10.21005/pif.2021.46.C-01

AERODYNAMICS OF THE CITY AERODYNAMIKA MIASTA

Mieczysław Kozaczko

PhD / architect

Author's Orcid number: 0000-0003-1252-8796

Poznan University of Technology
Faculty of Architecture
Institute of Architecture, Urban Planning and Heritage Protection

ABSTRACT

The “input-output desideratum”, outlined in the New Athens Charter, sets new requirements for urban designers. Nowadays, using modern techniques, we can solve weighty contemporary urban problems using such system of designing, which balances quantitative and qualitative parameters of the urban matter. The text presents the part of the designing system that uses methodology of the meteorology. Proper use of this system allows to control and design parameters of the so-called urban canopy. The urban canopy covers the area of reduced energy consumption and increased comfort of using the public space between the buildings constituting urban tissue. Urban canopy is characterized by multiplier effects, obtained - among others - thanks to the use of aerodynamics in urban design. Shaping buildings, supported by empirical method (with use of models), allows to implement the so-called filters and regulators postulated in the Charter: the elements that maintain the city's structure in balance

Key words: City aerodynamics, urban canopy.

STRESZCZENIE

Dezyderat input-output, naszkicowany w Nowej Karcie Ateńskiej stawia przed projektantami miast nowe wymagania. Może im sprostać system projektowania urbanistycznego, operujący balansem przestrzennych jakości z energetycznymi ilościami. Niniejszy tekst prezentuje tę część systemu, która w projektowaniu wykorzystuje metodologię meteorologiczną. Właściwe użycie jej aparatu umożliwia kontrolę i projektowanie parametrów tzw. miejskiej sfery. Miejska sfera jest obszarem o obniżonej energochłonności oraz podwyższonym komforcie użytkowania między budynkowej przestrzeni publicznej. Charakteryzują go efekty mnożnikowe, uzyskane – między innymi – dzięki wykorzystaniu aerodynamiki w projektowaniu urbanistycznym. Kształtowanie zabudowy, wspomagane metodą empiryczną (z użyciem modelu), pozwala realizować postulowane w Karcie filtry i regulatory: elementy utrzymujące strukturę miasta w równowadze.

Słowa kluczowe: Aerodynamika miasta, miejska sfera.

1. METEOROLOGICAL APPARATUS BEING USED IN URBAN PLANNING

This study discusses the methods of determining the wind speed in the city space. One of the derivatives of this parameter is the amount of air infiltrating buildings, and thus the amount of heat losses resulting therefrom. Average wind speed is important for balances in the scale of the entire urban complex. It can be calculated using the meteorological apparatus. What is important, the wind having the same average speed, increases in force in some places, worsening sanitary and operational conditions there. These can be precisely determined only in empirical way, after the buildings are completed or still in the design phase - with the use of small scale models in aerodynamic tunnel. Chapter 3 describes a device for measuring wind parameters anywhere in a building erected in the future. Its design allows - among others - the multiple reduction of future heating costs resulting from infiltration.

1.1. Wind parameters in the urban structure

Air masses move at different speeds in the city. It depends on the shape of the structure and eco-physiographic conditions in its surroundings. In the study of the influence of the shape of the structure on a specific parameter (eg on infiltration), other factors must remain the same. In particular, for the full comparability of the results, it was assumed for all cities that outside the examined tissue, the wind blows with the same exit speed $V_G = 5 \text{ m / s} = 3^{\circ}\text{B}$ (moderate wind according to Beaufort). It is the speed of the wind that is not disturbed by the spatial development method, i.e. the wind blowing sufficiently high (the so-called gradient wind). The underside of the gradient wind layer occurs at different heights (from 360 to 500 m), depending on the land covering. The wind, with the same speed outside each of the examined cities, will blow inside them at different speeds. Using the meteorological apparatus it is possible to calculate the speed of the wind blowing in a given area. Namely¹:

$$V_s = V_G(h_s/H_G)^{\alpha_L}$$

V_s is the wind speed at a height of $h_s = 10 \text{ m}$ above the ground, V_G is the wind speed in the above-described gradiental layer ($V_G = 5 \text{ m / s}$ for all tested cases), H_G is the height of the bottom of the gradiental air layer, α_L - power exponent depending on the development the terrain. Knowing the wind speed in the tested urban formation, it is possible to determine the pressure of air masses D_p on building walls and other aerodynamic obstacles (see Table 1). The force of wind pressure is determined by the Weisbach-Hagen formula [Żenczykowski 1970, p. 87]:

$$D_p = v^2 \cdot x_g / 2g$$

The symbol v here means the wind speed, and the expression $x_g / 2g$ takes, under uniform conditions, a constant value of $14.6 \text{ kg / m}^2\text{s}^2$ for the entire urban tissue [Kozaczko 2018, p. 163].

Table 1 shows seven types of land cover, distinguishable in terms of aerodynamics, as well as the values of the speed and pressure of the wind blowing in them at the height of $h_s = 10 \text{ m}$ (when outside the tested structure there is a wind speed of 5 m / s). As you can see, the "same" wind in high-rise building complexes (type 6 and 7) blows at three times lower speed (and nine times less force) than in regular suburban buildings (type 2).

Tab. 1. Wind speed and wind pressure at standard height in various types of structure. Source: [Gumula et al. 2006; Kozaczko 2018, s. 164; Lorenc 1992; Rozporządzenie Ministra Środowiska 5.12.2002, attachment 1; EN 1991-1-4, 2005; Archive of N N527 348934]

Type of land cover	Terrain type	Wind speed V_s [m / s]	Wind pressure D_p [Pa]
open area, low vegetation, single buidings	1	2,358	8,12
regular scattered suburban development	2	2,153	6,77
dense rural buildings, town - low buildings	3	1,864	5,07

¹ This formula, as well as parameters H_G and α_L was determined experimentally [Lorenc 1992].

city up to 10,000 inhabitants (15% buildings with a height > 15m)	4	1,559	3,55
medium-sized buildings, in cities up to 10,000 residents	5	1,166	1,98
high buildings in cities of 100,000 –500,000 residents	6	0,724	0,77
high buildings in cities > 500,000 residents	7	0,724	0,77

1.2. Energy used to heat the infiltrating air

The amount of heat to heat the infiltrating air depends on the wind pressure D_p . The amount in the air permeating through the unit area of the partition per unit time is²:

$$w = D_p/R_a$$

D_p is the average air pressure difference on both sides of the wall (wind pressure), R_a - resistance to air penetration through the partition, depending on its technical features ($R_a = \text{const}$; the technical features of the partition must be the same in all buildings, to make the calculations independent of factors other than the shape of the building). After substituting to the Weisbach-Hagen formula, we get:

$$w = v^2 x_g / (2g R_a) = v^2 \cdot \text{const}$$

Thus, the amount of air infiltrating the wall is directly proportional squared the speed of the incoming wind. Using the universal calorimetry formula [Kasperkiewicz 2012, p. 7], we can calculate the heat loss E caused by infiltration:

$$E = w c_p Dt$$

E here is the heat loss caused by infiltration, w - the amount of air penetrating the building's interior through the thermal barrier unit per unit time, c_p - the value of the specific heat of the air (according to PN-EN 12831), Dt - temperature difference between the inside and outside of the building. The formula can therefore be written as:

$$E = v^2 c_p Dt x_g / (2g R_a)$$

To avoid misrepresentation of the studied dependence, all parameters except the value of v must remain constant here, so:

$$E = v^2 \cdot \text{const}$$

As you can see, the amount of energy used to cover infiltration losses is directly proportional to the square of the speed of the wind blowing in the structure. This means (see Table 1) that under the same conditions, tall buildings (type 6 and 7) use 9 times less thermal energy to cover infiltration losses than suburban buildings (type 2).

2. SOME CHARACTERISTICS OF THE CITY CLIMATE BEING DEPENDENT ON AERODYNAMICS. THE "CITY SPHERE"

Inappropriate aerodynamics of the building means - apart from energy costs - also low comfort of using public space and its worse sanitary parameters.

In winter, wind is a factor that reduces the so-called the perceived temperature (being a derivative of the absolute temperature, air humidity and the speed of its movement). Further, with increasing air movement, the concentration of harmful dusts and contaminated particles, carried away from various surfaces, increases in it. Table 2 shows the relationship of these unfavorable phenomena with the shape of buildings. It can be observed that the wind blowing outside the city at the same

² Żenczykowski 1970, p. 87,88]. The unit of time here is - in all considerations - the entire heating season of the same length for all considered cases.

speed carries twice as much pollution in the dispersed structure of the suburbs (type 2) than in the town (type 4) and as much as five times more than in large cities (type 6 and 7)³. This implies a proportionally higher frequency of repairs and the necessary renovation of elements such as facades, windows, surfaces of benches and seats in public spaces, etc. Today, air pollution costs the average European citizen 380-490 euro [EEA 2014, p. 9], and it is a cost only material damage, not taking into account health issues (in Poland, every year air pollution causes premature death of about 40,000 people. It also causes about 10% of lung cancers [WHO 2013, p. 203]). The obstacles in pedestrian traffic are also a kind of "aerodynamic cost". The wind imposes a resistance of 1 kG among the dense downtown buildings (Table 2), in dispersed buildings it presses against it with a force of approx. 12 kG, which must be overcome, significantly increasing the communication effort.

Tab. 2. The concentration of harmful substances and the force with which the wind acts on a pedestrian in different types of structure (human aerodynamic resistance - after: [Hon Koo 2013, p. 99])

Type of land cover	Terrain type	Concentration of PM10 dust [mg / m ³]	Wind resistance in pedestrian traffic [kG]
open area, low vegetation, single buildings	1	115	18
regular scattered suburban development	2	90	12,5
dense rural buildings, town - low buildings	3	72	8,5
city up to 10,000 inhabitants (15% buildings with a height > 15m)	4	51	5,5
medium-sized buildings, in cities up to 10,000 residents	5	32	2,7
high buildings in cities of 100,000 –500,000 residents	6	16	1,1
high buildings in cities > 500,000 residents	7	15	1,0

3. DETERMINATION OF LOCAL WIND SPEEDS IN THE URBAN STRUCTURE

The above considerations relate to the average wind speeds and energy consumed in the entire structure under study. The methodology used in meteorology does not allow for direct calculations of local parameters occurring in a specific point of the city. And it is precisely the knowledge of local characteristics that is necessary in the scale of a single urban interior or a complex complex of buildings. The aerodynamic effects of shaping the urban structure differ greatly, even in places that are close to each other. Difficulties in determining the local fluctuations in wind pressure (causing various energy losses) and the variable location of the discomfort zones mean that in order to obtain results that are precise for a given place, the actual air flow between buildings should be tested on diminished models of buildings in the wind tunnel. Due to the Kelvin-Helmholz instability (resulting from the specific density and elasticity of the air, which results in chaotic turbulences), the model of the tested form must usually be close to the natural size (on a scale of 1: 1 – 1: 5). Further, the repeatability and precision of the results of the aerodynamic tests is the greater the faster the air movement is (therefore, wind speeds much greater than 10 m / s are preferred)⁴. Thus, the usefulness of a typical wind tunnel in city physics is very limited. Moreover, the aerodynamic effects of shaping extensive spatial structures extend to the bottom of the wind gradient layer (hence 350 – 500 m high). For a meaningful study of the city's aerodynamics, it is not so much an aerodynamic tunnel that is needed, but an even "aerodynamic hall" of considerable size and - therefore - enormous amounts of air pumped per unit time.

Taking into account the urban specifics (in particular the dimensional proportions of the city or district model), a better (more stable) medium than the air is a flowing model of an appropriate liquid

³ Calculations based on: [Stunder, Arya 1988, s. 136].

⁴ Meanwhile, urban planning is important - from the utility point of view - not extreme, but average speeds, similar to the so-called gentle wind (on the Beaufort scale approx. 3^oB = ca 5 m/s).

(water with admixture of solid particles or with a dye spot introduced in the right place). It is easier to define the flow of a liquid medium than a gas flow, obtaining precise results at the wind speeds crucial for the usable comfort: 1.0 – 8.0 m / s. The discussed device - a hydrodynamic gutter - is used to determine, by analogy, the wind speed in the urban structure, on models on a scale from 1:50 (parts of buildings) to 1:1000 (the entire structure).

3.1. Technical description of the device

A hydrodynamic gutter is a device used to precisely study the air movement in the planned urban complex (or rather, the study of fluid movement - analogous to air movement). The study covers the course of liquid streams flowing around individual buildings, as well as its local flow velocity in inter-building spaces (and, consequently, also the local pressure force on individual walls and other aerodynamic obstacles, including a human being walking on foot). In addition, the aerodynamic drag of the entire unit is also measured. This is an important parameter because the air pressure force (analogous to the liquid pressure force measured on the model) is also a measure of thermal energy used to cover thermal losses caused by cold air infiltration into all buildings of the complex.

The ideal model of the device is a rectangular gutter with dimensions of 100 × 60 × 220 cm (width × height × length). The tested models are placed in the trough, giving a constant stream of liquid containing markers of direction and speed (which precisely mark both these parameters at each point of the tested system). The liquid with appropriate characteristics circulates in a closed circuit, supplying the gutter with a homogeneous stream of constant average velocity. The key factor for the tests is an even liquid flow, regulated in the range from 5 dm³ / s to 50 dm³ / s. The bathtub is equipped with an inflow chamber which gives the liquid movement a laminar character. Behind the inflow chamber there is a working space for the tested models, and then a liquid outflow zone and a set of return pumps. So it is a relatively complex device.

For the implementation, a simplified variant of the bathtub was adopted, in which - instead of the movement of the pumped liquid - a working trolley with the tested model is moving inside it (cf. Fig. 1). From the point of view of research, the movement of the liquid in relation to the model is important and it does not matter whether the model is permanently attached to the bottom of the bathtub or whether it is movable. For practical reasons, this type of device gives reliable results (not affected by uncontrolled turbulence resulting from forced liquid flow) and does not require a pump set of high efficiency. However, it requires equipment with a drive unit that gives the trolley with the tested mock-up an appropriate speed of movement. To monitor the process, a second trolley is also necessary, moving along the bathtub at the speed of the mock-up, lifting the tripod with a camera recording the traces left by the flow markers. The trolleys move thanks to cords wound on the interconnected drive wheels, coupled with a simple gear with a small electric motor. The standard speed corresponds to a light wind (5 m / s). The speed is adjusted to the scale of the model. The scale 1: 500 corresponds to the mock-up carriage travel at a speed of 1 cm / s. This allows the study of urban layouts with real gross dimensions of approx. 500 × 500 m (25 ha). The measurement time (full travel of the trolley between extreme positions) is then 1.5 minutes. The movement of the tested model may also take place at higher speeds: 2 cm / s, 5 cm / s and 10 cm / s, in accordance with the scale of the model or in order to check its behavior at high wind speeds (e.g. in the case of a precise wind impact study in direct surroundings on the structure of the designed building). The markers are solid particles (0.25 mm fraction) with a specific density equal to that of water. The markers create a stable suspension, giving - thanks to the sufficient amount of this admixture - a reliable image of the streams flowing around the model. They reflect their exact course in every place of the tested model. The movement of markers is recorded with a distortion-free lens on a 24 MP photographic matrix, which allows to obtain an image of the air movement (represented by a suspension of markers) in the entire study group.

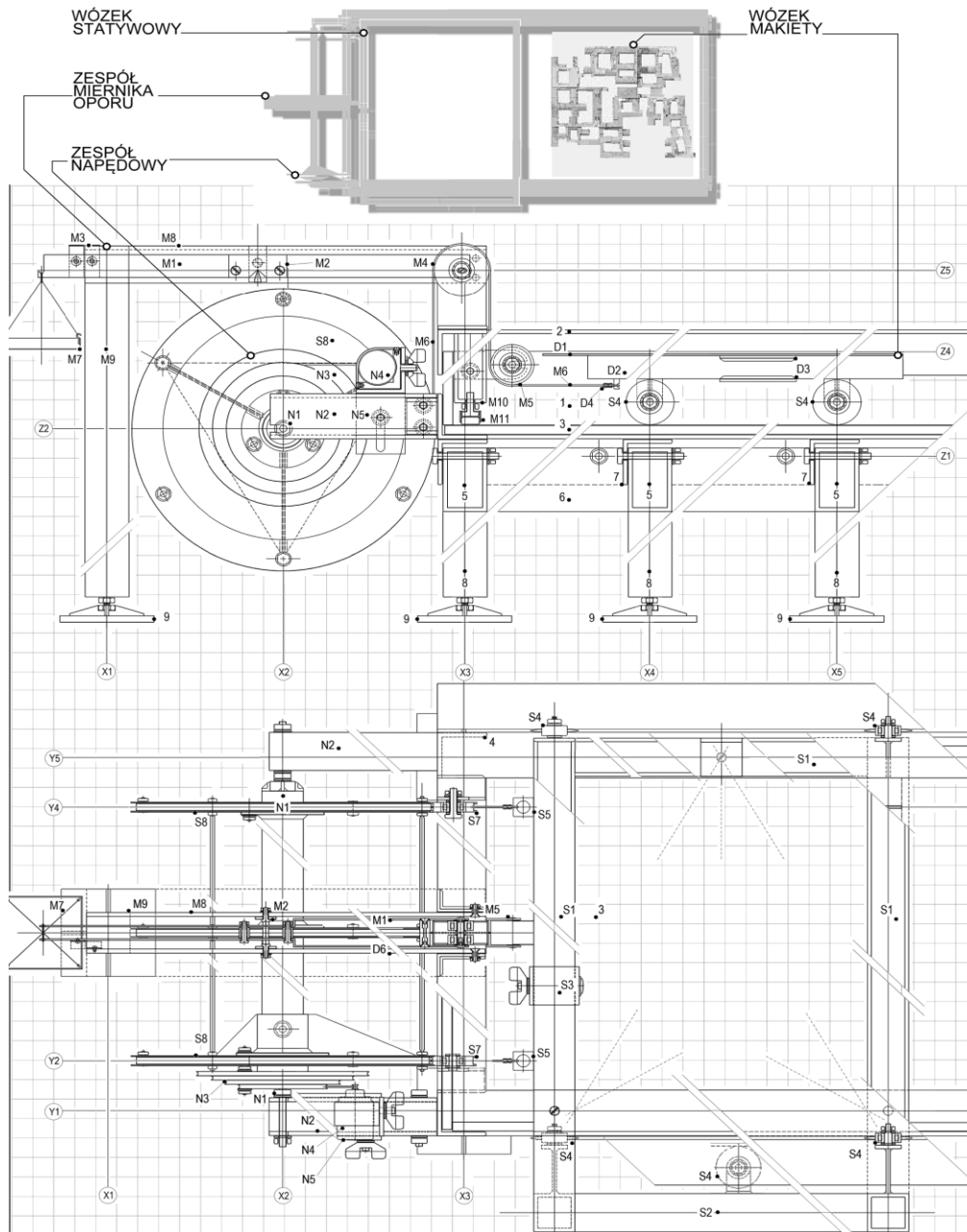


Fig. 1. Hydrodynamic bath - technical details (copyright reserved). Explanations: wózek statywowy - tripod trolley, wózek makiety - mock-up trolley, zespół miernika oporu - resistance gauge assembly, zespół napędowy – drive assembly.
 Fig. 1. Wanna hydrodynamiczna – szczegóły techniczne (prawa autorskie zastrzeżone)

3.2. Research methodology

First, the aerodynamic drag is measured directly with a weighing pan. The counterweight pan (measures of resistance) can be combined with an automatic electronic meter, which is important for shorter measurement times (higher travel speeds).

Secondly: a precise image of air streams (local wind directions) is recorded on the camera's matrix during an exposure lasting 1 s. During this time, each marker leaves a trace in the form of lines of various lengths.

Finally, thirdly: the wind speed v_i and its thrust force D_{pi} at "i" are directly proportional to the difference D_s between the length s_i of the marker trace left at this location "i" and the path s_G covered by the trolley at the same time t^5 . Therefore $D_s = |s_i - s_G|$. In addition, the following relationships are true:

$$D_s = |s_i - s_G| = |(v_i - v_G)t| = |a_i|t^2 \text{ oraz } D_s = |v_i \bullet \text{const} - v_G \bullet \text{const}|$$

where $|a_i|$ is the absolute value of the marker acceleration (or deceleration) at "i".

Further, by definition of acceleration: $a_i = D_p / m$, where m is the constant mass of the liquid pressing against the walls.

And so:

$$D_s = |(v_i - v_G)t| = |a| t^2 = (D_p/m)t^2, \text{ czyli } D_p = D_s \bullet \text{const}$$

3. SUMMARY

The aerodynamics of urban spaces can be controlled already at the design stage, shaping both economic and comfortable structures. These structures are characterized by both the visual order and the energy order, as well as the synergy of favorable microclimatic parameters. All such phenomena and feedback conducive to the comfort of use and the saving of energy and matter can be described as the urban sphere. Inside the urban sphere, multiplier effects are revealed, consisting in a significantly reduced consumption of heating energy⁶, which can be reduced to an average level not exceeding 10–15% of heat used to heat a complex consisting of identical buildings, but juxtaposed in an inappropriate way. Within the urban sphere, favorable sanitary conditions are stabilized (e.g. air dust and the concentration of harmful aerosols are minimized). The urban sphere also guarantees high usability of public space. The air temperature inside the city sphere is higher in winter than outside it, and on hot summer days - lower. Moreover, the comfort of pedestrian traffic in the public spaces of the urban sphere is much greater than outside it (e.g. wind resistance may be 18 times lower inside the sphere than in open terrain or in scattered buildings) [Kozaczko 2018, p. 125].

The urban sphere can be formed in both the existing and planned urban layouts, to correct the development (or the design concept) using a device measuring the local wind speed.

AERODYNAMIKA MIASTA

1. APARAT METEOROLOGII A URBANISTYKA

W niniejszym opracowaniu omówiono metody określania prędkości wiatru w przestrzeni miasta. Jedną z pochodnych tego parametru jest ilość powietrza infiltrującego do budynków, a więc i ilość wynikających stąd strat cieplnych. Dla bilansów w skali całego zespołu urbanistycznego istotna jest średnia prędkość wiatru. Można ją obliczać stosując aparat meteorologii. Jednakże wiatr, mając tę

⁵ The travel of the trolley at the speed v_G corresponds to the speed of movement of the air gradient layer.

⁶ Used to cover thermal losses caused both by the infiltration of cold air into buildings and the exfiltration of already heated air from them.

samą prędkość średnią, w niektórych miejscach przybiera na sile, pogarszając tam warunki sanitarne i użytkowe. Te można precyzyjnie określić tylko empirycznie, już po zrealizowaniu struktury albo jeszcze w fazie projektowej – z użyciem pomniejszonych modeli. W rozdz. 3 opisano urządzenie do pomiaru parametrów wiatru w dowolnym miejscu przyszłej struktury. Jej projektowa korekta pozwala m.in. na wielokrotne zredukowanie przyszłych kosztów ogrzewania, wynikających z infiltracji.

1.1. Parametry wiatru w miejskiej strukturze

Masy powietrza poruszają się w mieście z różną prędkością. Zależy to od ukształtowania struktury i warunków ekofizjograficznych w jej otoczeniu. W badaniu wpływu w y ł ą c z n i e ukształtowania struktury na określony parametr (np. na infiltrację), inne czynniki muszą pozostać ujednoczone. W szczególności, dla pełnej porównywalności wyników przyjęto dla wszystkich miast, że poza badaną tkanką wieje wiatr z jednakową prędkością wyjściową $V_G = 5 \text{ m/s} = 3^\circ\text{B}$ (wiatr umiarkowany wg Beauforta). Jest to prędkość wiatru nie zakłócanego sposobem zagospodarowania przestrzeni, a więc wiejącego odpowiednio wysoko (tzw. wiatru gradientowego). Spód warstwy wiatru gradientowego występuje na różnych wysokościach (od 360 do 500 m), zależnie od zagospodarowania terenu. Wiatr, mający poza każdym z badanych miast taką samą prędkość, wewnątrz nich będzie wiał z prędkością zróżnicowaną. Stosując aparat meteorologii można obliczyć prędkość wiatru wiejącego w danym terenie. Mianowicie⁷:

$$V_s = V_G(h_s/H_G)^{\alpha L}$$

V_s to prędkość wiatru na wysokości $h_s = 10 \text{ m}$ nad ziemią, V_G to prędkość wiatru w wyżej opisanej warstwie gradientowej ($V_G = 5 \text{ m/s}$ dla wszystkich badanych przypadków), H_G to wysokość spodu warstwy gradientowej powietrza, αL - wykładnik potęgowy zależny od zagospodarowania terenu. Znając prędkość wiatru w badanej strukturze można wyznaczyć napór mas powietrza D_p na ściany budynków i inne przeszkody aerodynamiczne (por. tab. 1). Siłę naporu wiatru określa wzór Weisbacha–Hagena [Żenczykowski 1970, s. 87]:

$$D_p = v^2 xg/2g$$

Symbol v oznacza tu prędkość wiatru, a wyrażenie $xg/2g$ przyjmuje w ujednoczonych warunkach stałą wartość $14,6 \text{ kg/m}^2\text{s}^2$ dla całej tkanki miejskiej [Kozaczko 2018, s. 163].

W tabeli 1 ukazano siedem rozróżnialnych pod względem aerodynamiki typów pokrycia terenu, a także wartości prędkości i naporu wiatru, wiejącego w nich na wysokości $h_s = 10 \text{ m}$ (gdy poza badaną strukturą panuje wiatr o prędkości 5 m/s). Jak widać, "ten sam" wiatr w zabudowie wysokiej (w terenie typu 6 i 7) wieje z 3–krotnie mniejszą prędkością (i z 9–krotnie mniejszą siłą) niż w regularnej podmiejskiej zabudowie (typu 2).

Tab. 1. Prędkość wiatru i jego napór na wysokości standardowej w różnych typach struktury. Źródło: [Gumuła et al. 2006; Kozaczko 2018, s. 164; Lorenc 1992; Rozporządzenie Ministra Środowiska 5.12.2002, załącznik nr 1; EN 1991-1-4, 2005; Archiwum N N527 348934]).

Rodzaj pokrycia terenu	Typ terenu	Prędkość wiatru V_s [m/s]	Napór wiatru D_p [Pa]
teren otwarty, niska roślinność, pojedyncze budynki	1	2,358	8,12
regularna, rozproszona zabudowa podmiejska	2	2,153	6,77
zwarta zabudowa wiejska, miasto – zabudowa niska	3	1,864	5,07
miasto do 10 tys. mieszk. (15% zab. o wys.>15m)	4	1,559	3,55
zabudowa średnia, w miastach do 10 tys. mieszk.	5	1,166	1,98
zabudowa wysoka w miastach 100–500 tys. mieszk.	6	0,724	0,77
zabudowa wysoka w miastach pow. 500 tys. mieszk.	7	0,724	0,77

⁷ Wzór ten, a także parametry H_G i αL wyznaczono doświadczalnie [Lorenc 1992].

1.2. Energia zużywana na ogrzanie infiltrującego powietrza

Ilość ciepła do ogrzania infiltrującego powietrza zależy od naporu wiatru D_p . Ilość w powietrza przenikającego przez jednostkę powierzchni przegrody w jednostce czasu wynosi⁸:

$$w = D_p/R_a$$

D_p to średnia różnica ciśnień powietrza po obu stronach przegrody (napór wiatru), R_a – opór przenikania powietrza przez przegrodę, zależny od jej cech technicznych ($R_a = \text{const}$; cechy techniczne przegród muszą być takie same, żeby obliczenia uniezależnić od czynników innych niż kształt zabudowy). Po podstawieniu do wzoru Weisbacha–Hagena otrzymujemy:

$$w = v^2 x_g / (2g R_a) = v^2 \cdot \text{const}$$

Zatem ilość powietrza infiltrującego przez ścianę jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości napierającego wiatru. Stosując uniwersalny wzór kalorymetrii [Kasperkiewicz 2012, s. 7], możemy obliczyć straty ciepła E spowodowane infiltracją:

$$E = w c_p Dt$$

E oznacza tu straty ciepła spowodowane infiltracją, w – ilość powietrza przenikającego do wnętrza budynków struktury przez jednostkę przegrody termicznej w jednostce czasu, c_p – wartość ciepła właściwego powietrza (wg PN-EN 12831), Dt – różnica temperatur między wnętrzem i zewnątrz pomieszczeń. Wzór można zatem zapisać w postaci:

$$E = v^2 c_p Dt x_g / (2g R_a)$$

By uniknąć skażenia badanej zależności wszystkie parametry oprócz wartości v muszą tu pozostać stałe, więc:

$$E = v^2 \cdot \text{const}$$

Jak więc widać, ilość energii zużywanej na pokrycie strat infiltracyjnych jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości wiatru wiejącego w strukturze. To oznacza (por. tab. 1), że zabudowa wysoka (teren typu 6 i 7) zużywa w tych samych warunkach 9-krotnie mniej energii cieplnej na pokrycie strat infiltracyjnych⁹ niż zabudowa podmiejska (typ 2).

2. NIEKTÓRE CECHY KLIMATU MIASTA ZALEŻNE OD AERODYNAMIKI. MIEJSKA SFERA

Niewłaściwa aerodynamika zabudowy to – oprócz kosztów energetycznych – także niski komfort korzystania z przestrzeni publicznej oraz jej gorsze parametry sanitarne.

Wiatr jest zimą czynnikiem obniżającym tzw. temperaturę odczuwalną (będącą pochodną temperatury bezwzględnej, wilgotności powietrza oraz prędkości jego ruchu). Dalej, wraz z rosnącym ruchem powietrza wzrasta w nim stężenie szkodliwych pyłów i skażonych cząstek, porywanych z różnych powierzchni. W tabeli 2 ukazano związek tych niekorzystnych zjawisk z ukształtowaniem zabudowy. Można zaobserwować, że wiatr wiejący poza miastem z taką samą prędkością, niesie dwukrotnie więcej zanieczyszczeń w rozproszonej strukturze przedmieść (typu 2) niż w miasteczku (typu 4) i aż pięciokrotnie więcej niż w dużych miastach (typu 6 i 7)¹⁰. Implikuje to proporcjonalnie większą częstotliwość remontów i niezbędnych renowacji elementów takich jak elewacje, okna, powierzchnie ławek i siedzisk w przestrzeni publicznej itp. Dziś zanieczyszczenie powietrza kosztuje przeciętnego mieszkańca Europy 380-490 euro [EEA 2014, s. 9], a jest to koszt wyłącznie zniszczeń materialnych, nieuwzględniający problematyki zdrowia (w Polsce zanieczyszczenie powietrza jest co roku przyczyną przedwczesnej śmierci ok. 40 tys. osób. Powoduje także ok. 10 proc. nowotworów płuc [WHO 2013, s. 203]). Swego rodzaju „kosztem aerodynamicznym” są także utrudnie-

⁸ [Żenczykowski 1970, s. 87,88]. Jednostką czasu jest tu – we wszystkich rozważaniach – cały sezon grzewczy o jednakowej długości dla wszystkich rozpatrywanych przypadków.

⁹ Dokładniej, prawidłowość ta dotyczy się przegród termicznych o identycznej szczelności w obu porównywanych strukturach i dotyczy ich każdego m² powierzchni.

¹⁰ Obliczenia na podstawie: [Stunder, Arya 1988, s. 136].

nia w ruchu pieszym. Wiatr stawiający idącemu wśród zwartej śródmiejskiej zabudowy opór o wielkości 1 kG (tab. 2), w zabudowie rozproszonej napiera nań z siłą ok. 12 kG, którą trzeba dodatkowo pokonać, znacznie zwiększając wysiłek komunikacyjny.

Tab. 2. Stężenie szkodliwych substancji oraz siła, z jaką wiatr działa na pieszego w różnych typach struktury (opór aerodynamiczny człowieka – za: [Hon Koo 2013, s. 99])

Rodzaj pokrycia terenu	Typ terenu	Stężenie pyłów PM10 [mg/m ³]	Opór wiatru w ruchu pieszym [kG]
teren otwarty, niska roślinność, pojedyncze budynki	1	115	18
regularna, rozproszona zabudowa podmiejska	2	90	12,5
zwarta zabudowa wiejska, miasto – zabudowa niska	3	72	8,5
miasto do 10 tys. mieszk. (15% zab. o wys.>15m)	4	51	5,5
zabudowa średnia, w miastach do 10 tys. mieszk.	5	32	2,7
zabudowa wysoka w miastach 100–500 tys. mieszk.	6	16	1,1
zabudowa wysoka w miastach pow. 500 tys. mieszk.	7	15	1,0

3. OKREŚLANIE LOKALNYCH PRĘDKOŚCI WIATRU W MIEJSKIEJ STRUKTURZE

Powyższe rozważania odnoszą się do średnich prędkości wiatru i energii zużywanej w całej badanej strukturze. Metodologia stosowana w meteorologii nie pozwala bowiem wprost na obliczenia parametrów lokalnych, występujących w konkretnym punkcie miasta. A właśnie znajomość lokalnych wartości jest niezbędna w skali pojedynczego wnętrza urbanistycznego lub złożonego zespołu zabudowy. Aerodynamiczne skutki ukształtowania struktury urbanistycznej różnią się między sobą bardzo znacznie nawet w miejscach od siebie nieodległych. Trudności w wyznaczeniu lokalnych fluktuacji ciśnienia wiatru (powodującego różne straty energii) oraz zmienne położenie stref dyskomfortu powodują, że chcąc uzyskać precyzyjne dla danego miejsca wyniki należy rzeczywisty przepływ powietrza między budynkami badać na pomniejszych modelach zabudowy w tunelu aerodynamicznym. Z powodu niestabilności Kelvina-Helmholza (wynikających ze specyficznej gęstości i sprężystości powietrza, stanowiących źródło chaotycznych turbulencji) model badanej formy musi zazwyczaj być wielkości zbliżonej do naturalnej (w skali 1:1–1:5). Dalej, powtarzalność i precyzja wyników badań aerodynamicznych jest tym większa, im szybszy jest ruch powietrza (preferowane są więc prędkości wiatru znacznie większe niż 10 m/s)¹¹. Zatem przydatność typowego tunelu aerodynamicznego w fizyce miasta jest bardzo ograniczona. Co więcej, aerodynamiczne skutki ukształtowania rozległych struktur przestrzennych sięgają aż do spodu warstwy gradientowej wiatru (a więc wysokości 350–500 m). Do miarodajnego badania aerodynamiki miasta potrzeba więc nie tyle aerodynamicznego tunelu, co wręcz “aerodynamicznej hali” znacznej wielkości i – tym samym – olbrzymich ilości powietrza przepompowywanego w jednostce czasu.

Biorąc pod uwagę specyfikę urbanistyczną (w szczególności proporcje wymiarowe modelu miasta lub dzielnicy), ośrodkiem lepszym (stabilniejszym) od powietrza jest opływająca model odpowiednia ciecz (woda z domieszką cząstek stałych lub z punktowo wprowadzanym w odpowiednim miejscu barwnikiem). Bowiem łatwiej można zdefiniować przepływ czynnika ciekłego niż gazu, uzyskując przy tym precyzyjne wyniki przy kluczowych dla komfortu użytkowego prędkościach wiatru: 1,0–8,0 m/s. Omawiane urządzenie – rynną hydrodynamiczną – służy określaniu *per analogiam* prędkości wiatru w strukturze urbanistycznej, na modelach w skali od 1:50 (części budynków) do 1:1000 (cała struktura).

¹¹ Tymczasem dla urbanistyki istotne są – z użytkowego punktu widzenia – nie ekstremalne, a przeciętne prędkości, zbliżone do tzw. wiatru łagodnego (w skali Beauforta ok. 3^oB = ok. 5 m/s).

3.1. Opis techniczny urządzenia

Wanna hydrodynamiczna jest urządzeniem służącym do precyzyjnego badania ruchu powietrza względem projektowanego zespołu urbanistycznego (a właściwie badania ruchu cieczy – analogicznego do ruchu powietrza). Badaniu podlega przebieg strug cieczy opływającej poszczególne budynki, a także jej lokalna prędkość przepływu w międzybudynkowych przestrzeniach (i – co za tym idzie – także lokalna siła naporu na poszczególne ściany i inne przeszkody aerodynamiczne, wliczając w to poruszającego się pieszo człowieka). Ponadto mierzony jest też opór aerodynamiczny całego zespołu. Jest to istotny parametr, ponieważ siła naporu powietrza (analogiczna do mierzonej na modelu siły naporu cieczy) jest równocześnie miarą energii cieplnej zużywanej na pokrycie strat termicznych wywołanych infiltracją zimnego powietrza do wszystkich budynków zespołu.

Idealny model urządzenia to prostopadłościenna rynna o wymiarach $100 \times 60 \times 220$ cm (szerokość \times wysokość \times długość). W rynnie umieszcza się badane modele, podając tam stały strumień cieczy zawierającej markery kierunku i prędkości (które precyzyjnie oznaczają oba te parametry w każdym miejscu badanego układu). Ciecz o odpowiedniej charakterystyce krąży w obiegu zamkniętym, zasilając rynnę jednorodnym strumieniem o stałej prędkości średniej. Dla badań kluczowy jest równomierny przepływ cieczy, regulowany w granicach od $5 \text{ dm}^3/\text{s}$ do $50 \text{ dm}^3/\text{s}$. Wanna jest wyposażona w komorę napływu, nadającą ruchowi cieczy laminarny charakter. Za komorą napływu znajduje się przestrzeń robocza dla badanych modeli, a dalej strefa odpływu cieczy i zespół pomp zwrotnych. Jest to więc stosunkowo złożone urządzenie.

Do realizacji przyjęto uproszczony wariant wanny, w której – zamiast ruchu przepompowywanej cieczy – porusza się zanurzony w niej roboczy wózek z badanym modelem (por. fig. 1). Z punktu widzenia badań istotny jest bowiem ruch cieczy względem modelu i nie ma znaczenia, czy model ten jest stale związany z dnem wanny, czy jest ruchomy. Ze względów praktycznych taki właśnie typ urządzenia daje wyniki miarodajne (nieobarczone wpływem niekontrolowanych turbulencji pochodzących od wymuszonego przepływu cieczy) i nie potrzebuje przy tym zespołu pomp o wielkiej wydajności. Wymaga jednak wyposażenia w zespół napędowy, nadający wózkowi z badaną makietą odpowiednią prędkość przesuwu. Dla monitorowania procesu niezbędny jest też drugi wózek, poruszający się wzdłuż wanny z prędkością ruchu makiety, unoszący statyw z kamerą zapisującą ślady pozostawiane przez markery przepływu. Wózki poruszają się dzięki cięglom w postaci linek nawijanych na połączone ze sobą koła napędowe, sprzężone prostą przekładnią z małym silnikiem elektrycznym. Standardowa prędkość odpowiada wiatrowi słabemu (5 m/s). Prędkość jest dostosowana do skali modelu. Skali 1:500 odpowiada przesuw wózka makiety z prędkością 1 cm/s . Pozwala to badać układy urbanistyczne o rzeczywistych wymiarach brutto ok. $500 \times 500 \text{ m}$ (25 ha). Czas pomiaru (pełnego przesuwu wózka między skrajnymi położeniami) wynosi wówczas $1,5 \text{ min}$. Ruch badanego modelu może także odbywać się z większymi prędkościami: 2 cm/s , 5 cm/s i 10 cm/s , w dostosowaniu do skali modelu lub w celu sprawdzenia jego zachowania przy dużych prędkościach wiatru (np. przy precyzyjnym badaniu wpływu wiatru w bezpośrednim otoczeniu na konstrukcję projektowanego budynku). Markerami są drobiny stałe (o frakcji $0,25 \text{ mm}$) o gęstości właściwej równej gęstości wody. Markery tworzą więc stabilną zawiesinę, dając - dzięki wystarczającej ilości tej domieszki - miarodajny obraz strumieni opływającego model ośrodka. Odwzorowują ich dokładny przebieg w każdym miejscu badanego modelu. Ruch markerów jest rejestrowany za pomocą bezdystorsyjnego obiektywu na matrycy fotograficznej o rozdzielczości 24 MP , co pozwala uzyskać obraz ruchu powietrza (reprezentowanego przez zawiesinę markerów) w całym badanym zespole.

3.2. Metodologia badań

Po pierwsze: pomiar oporu aerodynamicznego następuje bezpośrednio, za pomocą wagi szalkowej. Szalka przeciwwagi (miary oporu) może być zespolona z automatycznym miernikiem elektronicznym, co jest istotne przy krótszych czasach pomiaru (większych prędkościach przesuwu).

Po drugie: precyzyjny obraz strug powietrza (lokalnych kierunków wiatru) zostaje zarejestrowany na matrycy aparatu fotograficznego podczas ekspozycji trwającej 1 s . W tym czasie każdy marker zostawia ślad w postaci linii o różnej długości.

Wreszcie, po trzeciej: prędkość wiatru v_i oraz siła jego naporu Dp_i w miejscu „i” są wprost proporcjonalne do różnicy Ds między długością s_i śladu markera pozostawionego w tym miejscu „i” a drogą s_G pokonywaną przez wózek w tym samym czasie t ¹². Zatem

$Ds = |s_i - s_G|$. Ponadto prawdziwe są poniższe związki:

$$Ds = |s_i - s_G| = |(v_i - v_G)t| = |a_i|t^2 \text{ oraz } Ds = |v_i \cdot \text{const} - v_G \cdot \text{const}|$$

gdzie $|a_i|$ jest bezwzględną wielkością przyspieszenia (lub hamowania) markera w miejscu „i”.

Dalej, z definicji przyspieszenia: $a_i = Dp/m$, przy czym m jest stałą masą cieczy, napierającą na ściany.

A więc:

$$Ds = |(v_i - v_G)t| = |a| t^2 = (Dp/m)t^2, \text{ czyli } Dp = Ds \cdot \text{const}$$

3. PODSUMOWANIE

Aerodynamikę miejskich przestrzeni można kontrolować już na etapie projektowania, kształtując struktury ekonomiczne i komfortowe zarazem. Struktury te charakteryzuje zarówno ład wizualny, jak i ład energetyczny, a także synergia korzystnych parametrów mikroklimatycznych. Ogół takich zjawisk i sprzężeń sprzyjających komfortowi użytkownika oraz oszczędności energii i materii można określić mianem miejskiej sfery. Wewnątrz miejskiej sfery ujawniają się efekty mnożnikowe polegające na znacznie obniżonym zużyciu energii grzewczej¹³, którą można zredukować do średniego poziomu nie przekraczającego 10–15% ciepła zużywanego na ogrzewanie zespołu składającego się z identycznych budynków, lecz zestawionych ze sobą w niewłaściwy sposób. Wewnątrz miejskiej sfery następuje stabilizacja korzystnych warunków sanitarnych (np. minimalizacja zapylenia powietrza oraz stężenia szkodliwych aerozoli). Miejska sfera gwarantuje także wysoki komfort użytkowy przestrzeni publicznej. Temperatura powietrza wewnątrz miejskiej sfery jest zimą wyższa niż poza nią, a w dni upalne latem – niższa. Ponadto komfort ruchu pieszego w publicznych przestrzeniach miejskiej sfery jest znacznie większy niż poza nią (np. opór stawiany przez wiatr może być wewnątrz sfery 18-krotnie mniejszy niż w terenie otartym lub w zabudowie rozproszony) [Kozaczko 2018, s. 125].

Miejską sferę można formować zarówno w istniejących, jak i projektowanych układach urbanistycznych, do korekty zabudowy (lub projektowego zamysłu) używając urządzenia mierzącego lokalną prędkość wiatru.

BIBLIOGRAPHY

- Borysiewicz, M. (red.): 1996, *Komputerowe modelowanie rozprzestrzeniania się skażeń w atmosferze*, AND
- European Council of Town Planners: 2003, *The New Charter of Athens 2003 (The European Council of Town Planners' Vision for Cities in the 21st century)*, Lisbon
- EEA: 2010, *Środowisko Europy 2010 – Stan i prognozy: Synteza*, Europejska Agencja Środowiska, Kopenhaga
- Frey, H.: 1999, *Designing the City. Towards a More Sustainable Urban Form*, Routledge, London
- Frohn, R., C.: 1998, *Remote Sensing for Landscape Ecology: New Metric Indicators for Monitoring, Modeling, and Assessment of Ecosystems*, Lewis Publishers, Boca Raton
- Gibbs, J., P.: 1961, *Urban Research Methods*, D. Van Nostrand Co., Inc., New York
- Gumuła, S., Knap, T., Strzelczyk, P., Szczerba, Z.: 2006 *Energetyka wiatrowa*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowe - Dydaktyczne, AGH, Kraków

¹² Przesuw wózka z prędkością v_G odpowiada prędkości ruchu warstwy gradientowej powietrza.

¹³ Zużywanego na pokrycie strat termicznych wywołanych zarówno infiltracją zimnego powietrza do budynków, jak i eksfiltracją z nich powietrza już ogrzanego.

- Hon Koo, M., Al-Obaidi, A.: 2013, *Calculation of Aerodynamic Drag of Human Being in Various Positions*, EURECA, Subang Jaya
- Jarża, A.: 1998, *Aktualne zagadnienia aerodynamiki atmosferycznej warstwy przyziemnej*, materiały XIII Krajowej Konferencji Mechaniki Płynów
- Kasperkiewicz, K.: 2012, *Metoda oceny zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania istniejących budynków mieszkalnych*, ITB, Warszawa
- Kopcewicz, T.: 1959, *Fizyka atmosfery*, PWN, Warszawa
- Kozaczko, M.: 2005, *Zrównoważona struktura zabudowy mieszkaniowej*, ZNPP, Poznań
- Kozaczko, M.: 2011, *Oddziaływanie struktury urbanistycznej na energochłonność ogrzewania budynku*, ZNPP, Poznań
- Kozaczko, M.: 2018, *Energochłonność struktur urbanistycznych*, WPP, Poznań.
- Kurowski, M.: 2003, *Koherentna struktura wirów punktowych w zewnętrznym przepływie rozciągającym*, UW Warszawa
- Landsberg, H.E.: 1981, *The Urban Climate*, Academic Press, New York
- Laskowski, L.: 1987, *Wybrane zagadnienia fizyki miasta*, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa
- Linacre, E.: 1992, *Climate Data and Resources*, Routledge, London - New York
- Lorenc, H.: 1992, *Zasoby wiatru w Polsce*, Materiały badawcze IGIMW, Seria Meteorologia 18, Warszawa
- Płoński, W.: 1974, *Klimat i budownictwo*, Prace ITB, Warszawa
- Różański, S.: 1959, *Budowa miasta a jego klimat*, Arkady, Warszawa
- Różycka, W., Gacka-Grzesikiewicz, E.: 1972, *Warunki klimatyczne a przestrzenna struktura miasta. Wybrane zagadnienia*, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa
- Sorbjan, Z.: 1983, *Turbulencja i dyfuzja w dolnej atmosferze*, PWN, Warszawa
- Strzeszewski, M., Wereszczyński, P.: 2009, *Norma PN-EN 12831. Nowa metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*, Rettig Heating, Warszawa
- Stunder, B., Arya, S.: 1988, *Windbreak Effectiveness For Storage Pile Fugitive Dust Control: A Wind Tunnel Study*, Journal Of The Air Pollution Control Association vol.38
- Trepińska, J.: 2005, *Pionowy profil prędkości wiatru przyziemnego*, Folia Geographica, Series Geographica – Physica vol. XXXV – XXXVI
- Vugts, H., F., Cannemeijer, F.: 1981, *Measurements of drag coefficients and roughness length at a sea-beach interface*, J. Appl. Meteorol. 20
- WHO European Centre for Environment and Health: 2013, *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project*, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen
- Wiśniewski, S., Wiśniewski, T.: 2000, *Wymiana ciepła*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa
- Wójcicka, J.: 1971, *Uciążliwość klimatu miast i możliwości jego poprawy za pomocą roślinności*, IUA, Warszawa
- Zhdanov, S., K.: 2000, *Nonlinear theory of Kelvin-Helmholtz instability*, Moscow Engineering Physics Institute, 15409, Moscow
- Żenczykowski, W.: 1970, *Budownictwo ogólne*, tom IV, Arkady, Warszawa
- Żurański, J.: 1978, *Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji*, Arkady, Warszawa
- EN 1991-1-4:2005. European standard for wind actions on structures, Brussels 2008. PN-EN 1991-1-4: 2008 Oddziaływania na konstrukcje - Część 1-4: Oddziaływania ogólne - Oddziaływania wiatru
- DIN EN 12831:2003. Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast
- PN-B-02025; 2001. Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego
- PN-EN ISO 13371:2001 Właściwości cieplne budynków. Wymiana ciepła przez grunt. Metody obliczania
- PN-EN 12831:2006 Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego, PKN, Warszawa 2006
- PN-EN 13829:2002 Właściwości cieplne budynków. Określenie przepuszczalności powietrznej budynków. Metoda pomiaru ciśnieniowego z użyciem wentylatora, PKN, Warszawa 2002
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dn. 30 czerwca 2004 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączania podmiotów do sieci ciepłowniczych oraz eksploatacji tych sieci
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 3 czerwca 2014 r. W sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną

całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw charakterystyki energetycznej, Dz. U. Z dnia 2 lipca 2014, poz. 888

Rozporządzenie Ministra Środowiska z 14.11.2002 r. w sprawie szczegółowych warunków, jakim powinna odpowiadać prognoza oddziaływania na środowisko dotycząca projektów miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego (Dz.U. nr 197, poz. 1667)

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 5 grudnia 2002 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu, Dz.U. 2003 nr 1 poz. 12

AUTHOR'S NOTE

The author's field of research is the issue of coherent (balanced) architectural and urban composition.

O AUTORZE

Autor zajmuje się zagadnieniami spójnej kompozycji architektonicznej i urbanistycznej.

Contact | Kontakt: kozaczko@put.poznan.pl