

WYKORZYSTANIE METODY POTENCJAŁÓW WĘZŁOWYCH DO MODELOWANIA TESTU CIŚNIENIOWEGO BUDYNKU

Artur MISZCZUK^{1*}, Dariusz HEIM²

¹Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, IIB, ZBOiZR,
al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, email: a.miszczuk@il.pw.edu.pl

²Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Środowiska
ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, e-mail: dariusz.heim@p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy zaproponowano sposób podejścia do oceny szczelności na etapie projektu budowlanego. Przedstawiono zasady modelowania przepływu powietrza w budynku metodą potencjałów węzłowych. Wykonano symulację testu szczelności wybranego budynku. Zaproponowano dwa sposoby budowy sieci przepływów oraz sposobu obierania komponentów i ich połączeń. Pierwszy sposób polega na analizie projektu architektoniczno-budowlanego (stan przed realizacją). W drugim dane projektowe uzupełniane są dodatkowo o informacje uzyskiwane w wyniku badań terenowych (stan po wykonaniu obiektu). Wymiernym efektem przedstawionych badań było uzyskanie modelu komputerowego w pełni zgodnego ze stanem rzeczywistym. W wyniku przeprowadzonych obliczeń oraz na podstawie testu szczelności uzyskano ten sam poziom współczynnika $n_{50} = 1,78 \text{ h}^{-1}$. Zaproponowana metoda posiada również istotny potencjał aplikacyjny z uwagi na możliwość szacowania szczelności budynku na etapie projektu.

Słowa kluczowe: szczelność, przepływ powietrza, symulacja, infiltracja, oszczędność energii.

1. WPROWADZENIE

W Polsce metoda pomiaru szczelności budynku „blower door test” wg PN-EN ISO 9972:2015 [1] stosowana jest z powodzeniem od wielu lat. Dostępna na rynku aparatura pomiarowa pozwala sprawnie przeprowadzać testy dowolnych budynków na każdym etapie ich budowy. Choć wymagania dotyczące granicznych wartości szczelności nie są na dzień dzisiejszy obligatoryjne [2], to jednak wielu inwestorów decyduje się przeprowadzić takie testy w celu wyeliminowania źródeł potencjalnych przecieków, wpływających na zwiększenie zapotrzebowania budynku na energię do ogrzewania i chłodzenia [3]. Ponadto wiele programów finansowych wspierających energooszczędne

budownictwo (jak np. „Efektywne wykorzystanie energii. Dopłaty do kredytów na budowę domów energooszczędnych”) w swoich założeniach posiada wytyczne dotyczące parametrów szczelności takich jak np. współczynnik krotności wymian powietrza przy różnicy ciśnienia równej 50 Pa (n_{50}).

Przyczyną występowania nieszczelności w nowo projektowanych budynkach są najczęściej błędy popełniane na etapie ich projektowania i realizacji. Jednak ryzyko pojawienia się defektów obudowy może być również zdeterminowane poprzez geometrię budynku, układ konstrukcyjny, długość połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami (m.in. przejść instalacji przez przegrody [4]), budowę samych przegród [5] i rodzaj zastosowanych materiałów oraz rozwiązania detali architektonicznych. Wprowadzając odpowiednią systematykę możliwe jest zdefiniowanie właściwości i charakterystyk potencjalnych nieszczelności w celu zbudowania komputerowego modelu szczelności budynku na etapie jego projektowania. Dodatkowo dla budynków już istniejących możliwe jest doprecyzowanie modelu na podstawie inwentaryzacji nieszczelności i określenia rzeczywistego współczynnika n_{50} . Dzięki temu istnieje również możliwość:

- 1) wskazania nieszczelności mających największy wpływ na końcowy wynik testu;
- 2) oszacowania strat ciepła na podgrzanie powietrza infiltrującego w sezonie ogrzewczym;
- 3) wyznaczenia mocy strat ciepła w warunkach projektowych;
- 4) określenia potencjału oszczędności energii wynikających z doszczelnienia budynku.

Celem badań, których wyniki zamieszczono w niniejszej pracy, było wykonanie modelu dla potrzeb symulacji

* Autor korespondencyjny, e-mail: a.miszczuk@il.pw.edu.pl

zachowania się budynku w warunkach testu ciśnieniowego. Model opracowano dla wybranego, istniejącego budynku mieszkalnego jednorodzinnego. Pierwotnie model opracowany został na etapie projektu budowlanego przy założeniu oczekiwanego poziomu szczelności $n_{50}=0.6 \text{ h}^{-1}$. Następnie, znając wynik testu szczelności przeprowadzonego na rzeczywistym obiekcie oraz po zinventaryzowaniu wszystkich występujących nieszczelności, zmodyfikowano model, w celu uzyskania zgodności, co do rzeczywistego poziomu szczelności $n_{50} = 1,78 \text{ h}^{-1}$.

2. NUMERYCZNY OPIS PRZEPLYWU PŁYNU

Na podstawie analizy literatury przedmiotu można wyróżnić dwie metody wykorzystywane w analizie przepływów [6]:

- obliczeniowa dynamika płynów (CFD), metoda, która wykorzystuje rozwiązanie równań bilansu masy, pędu i energii we wszystkich punktach dwu- lub trójwymiarowego układu wewnątrz lub wokół analizowanego obiektu. Teoretycznie możliwe jest, aby do symulacji procesów wymiany ciepła w płynach wykorzystywane było modelowanie CFD. Jednakże modele CFD są stosowane przede wszystkim do zagadnień dynamicznych. Przykładem w dziedzinie symulacji energetycznej budynków jest możliwość predykcji temperatury i prędkości powietrza wewnątrz dużych i skomplikowanych geometrycznie pomieszczeń oraz wyznaczanie poziomu ciśnienia wiatru wokół budynku [7];
- metoda bilansu masowego/przepływu sieciowego (metoda strefowa). Podejście to wykorzystuje założenie, że budynek i/lub instalacje mogą być analizowane, jako układy składające się z szeregu stref (na przykład pomieszczeń, elementów instalacji reprezentowanych przez węzły (o parametrach skupionych), które są powiązane ze sobą za pomocą połączeń/komponentów (na przykład otwory, szczeliny, przewody, rury). Ponadto zakłada się, że istnieje nieliniowa zależność pomiędzy przepływem przez dany komponent, a różnicą ciśnień. Zasada zachowania masy w przypadku przepływu do i od każdego węzła prowadzi do zbioru równań nieliniowych, które muszą być rozwiązywane numerycznie. Liczba węzłów, a tym samym równań jest znacznie mniejsza niż w przypadku modelowania techniką CFD.

Metoda bilansu sieciowego może być stosowana zarówno do analizy przepływu powietrza, jak i również przepływu płynu w instalacjach. Model ten jest stosowany przy modelowaniu przepływu masowego płynu m.in. w programie ESP-r [8]. Podejście sieciowe ułatwia również

indywidualne opracowanie modeli komponentów, równań opisujących przepływ i sposobu ich rozwiązania. Program ma budowę modułową, w obszarze przepływów wykorzystywany jest moduł *mfs* (mass flow solver). Umożliwia on niezależne badanie przepływów w budynku i/lub instalacji. Modelowanie przepływu płynu w metodzie sieciowej wymaga [6]:

- zdefiniowania układu przestrzennego poprzez system węzłów i połączeń,
- określenia warunków brzegowych,
- matematycznej i numerycznej charakterystyki poszczególnych ścieżek przepływu płynu,
- rozwiązywania zbioru równań (nieliniowych).

Równania i zależności zdefiniowane w podprogramie *mfs* odnoszą się przede wszystkim do ostatnich dwóch aspektów.

3. KOMPONENTY SKŁADOWE SIECI PRZEPLYWÓW POWIETRZA

Jednym z rodzajów modelowania jest metoda sieciowa. Przepływ płynu pomiędzy poszczególnymi węzłami reprezentującymi strefy (jako objętości skończone) budynku odbywa się poprzez komponenty. Komponenty determinują mechanizm przepływu powietrza oraz jego opór. Reprezentują one rzeczywiste komponenty budowlane takie jak np. drzwi, okna, otwory stałe lub defekty liniowe – np. szczeliny w miejscach połączeń przegród oraz stolارce okiennej i drzwiowej. W budynkach przepływ płynu lub powietrza może występować także w postaci czynnika roboczego w elementach instalacji budowlanych. Najczęstsze przykłady przepływów występujących w budynkach to [6]:

- przepływ powietrza w systemie instalacji wentylacyjnej,
- przepływ powietrza przez szczeliny i otwory w przegrodach zewnętrznych budynku i ścianach wewnętrznych,
- przepływ czynnika roboczego w systemie instalacji ogrzewania/chłodzenia.

3.1. Teoretyczne komponenty i ich charakterystyki przepływowe

W analizowanym budynku przyjęto, iż wszystkie węzły konstrukcyjne wykonano w sposób prawidłowy eliminujący możliwość pojawienia się nieszczelności. Budynek został wzniesiony na żelbetowej płycie fundamentowej, ze ścianami murowanymi oraz żelbetową konstrukcją stropodachu. W takim przypadku w modelu teoretycznym, jako komponenty przyjęto otwarte drzwi wewnętrzne (przepływ dwukierunkowy), zaś za elementy będące źródłem infiltracji miejsca połączenia stolarki okiennodrzwiowej ze ścianą zewnętrzną. Długość nieszczelności

oszacowano jako 25% obwodu otworów, zaś szerokość przyjęto na podstawie opracowania [9], jako 0,25 mm/mb analizowanego połączenia.

Największa nieszczelność w modelu teoretycznym znajduje się w salonie w miejscu połączenia stolarki okiennej ze ścianą (P11), zaś nieco mniejsza w sypialni (P3). Dokładny opis nieszczelności z podziałem na pomieszczenia został przedstawiony w tabeli 1. Powierzchnia całkowita wszystkich miejsc infiltracji powietrza wyniosła 62 cm².

Tabela 1. Zestawienie teoretycznych i rzeczywistych nieszczelności występujących w powłoce zewnętrznej budynku.
Table 1. Summary of theoretical and actual leaks in the outer shell of the building.

Oznac. nieszczelności	Pomieszczenie	Miejsce nieszczelności	Wymiar teoretycznej nieszczelności (szer. X dl.) [mm x m]	Wymiar rzeczywistej nieszczelności (szer. X dl.) [mm x m]
P1	pralnia	przeście instalacji wentylacyjnej przez folię paroizolacyjną	brak	10 x 0,9
P2	pokój 1	połączenie stolarki okiennej ze ścianą	0,25 x 2,1	3 x 2,3
P3	sypialnia	połączenie stolarki okiennej ze ścianą	0,25 x 2,4	2 x 0,7
P4	sypialnia	połączenie okna dachowego z dachem	0,25 x 0,8	2 x 1,3
P5	garderoba	połączenie okna dachowego z dachem	0,25 x 1,3	2 x 0,9
P6	wiatrołap	połączenie stolarki drzwiowej ze ścianą	0,25 x 1,1	0,5 x 3,6
P7	wiatrołap	połączenie stolarki okiennej ze ścianą	0,25 x 0,7	0,5 x 2,5
P8	kuchnia	połączenie okna dachowego z dachem	0,25 x 1,3	0,5 x 4,4
P9	kuchnia	połączenie okna dachowego z dachem	0,25 x 1,3	0,5 x 4,4
P10	kuchnia	połączenie stolarki okiennej ze ścianą	0,25 x 1,8	0,5 x 4,4
P11	salon	połączenie stolarki okiennej ze ścianą	0,25 x 4,9	0,5 x 16,8
P12	pralnia	ościeżnica drzwi do garażu	0,25 x 1,5	0,5 x 5,5
P13	pokój 2	połączenie stolarki okiennej ze ścianą	0,25 x 2,1	0,5 x 7,2
P14	korytarz	połączenie okna dachowego z dachem	0,25 x 0,8	0,5 x 2,8
P15	korytarz	połączenie okna dachowego z dachem	0,25 x 1,3	0,5 x 4,4
P16	salon	połączenie okna dachowego z dachem	0,25 x 1,3	0,5 x 4,4

3.2. Rzeczywiste wielkości i charakterystyki przepływowe komponentów w analizowanym budynku

Podobnie jak w przypadku komponentów przyjętych w modelu teoretycznym, w modelu rzeczywistym rozważono również te same komponenty, czyli drzwi wewnętrzne rozdzielające poszczególne ogrzewane strefy oraz komponenty, przez które powietrze infiltruje do wnętrza budynku. Do nieszczelności należą połączenia stolarki okienno-drzwiowej ze ścianą oraz przejście instalacji wentylacyjnej przez przegrodę zewnętrzną (tabela 1).

Największą nieszczelność (tabela 1) występującą w budynku zlokalizowano w pralni (P1), zaś nieco mniejszą powierzchniowo w salonie (P11) w miejscu połączenia stolarki okiennej ze ścianą zewnętrzną. Sumaryczna powierzchnia wszystkich szczelin w budynku wyniosła 519 cm² i jest ona prawie 10-krotnie większa niż w modelu teoretycznym.

Powodem infiltracji powietrza do pralni (pomieszczenia ogrzewanego) z garażu (pomieszczenia nieogrzewanego) jest niedostatecznie uszczelnione przejście instalacji wentylacyjnej. Rury służące do dostarczenia do rekuperatora świeżego oraz wyrzutu zużytego powietrza przechodzą przez folię paroizolacyjną, a następnie prowadzone w garażu wyprowadzone są na zewnątrz budynku. Przejście wykonano w sposób niedostatecznie precyzyjny, co skutkuje występowaniem nieszczelności. Prawdopodobnie jednak w symulacjach testu szczelności w nadciśnieniu większą rolę spośród wymienionych będzie odgrywała nieszczelność zlokalizowana w salonie ze względu na bezpośrednie połączenie tego pomieszczenia ze środowiskiem zewnętrznym.

Najwięcej nieszczelności w analizowanym budynku znajduje się na połączeniu stolarki okiennej z przegrodami zewnętrznymi tj. ze ścianami (P2, P3, P6, P7, P10, P11 oraz P13) oraz stropodachem (P4, P5, P8, P9, P14, P15 oraz P16). W budynku występuje również infiltracja w miejscu połączenia skrzydła drzwiowego z jego ościeżnicą w przegrodzie rozdzielającej pralnię od garażu (P12).

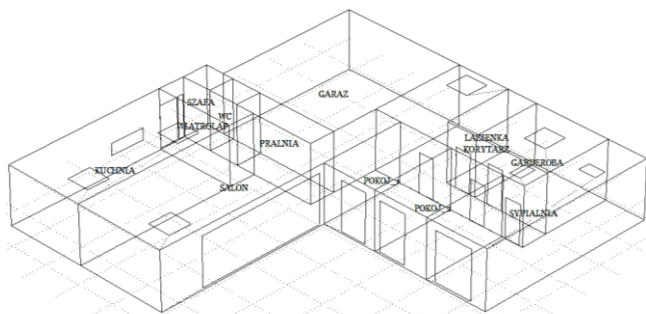
4. MODEL SIECI PRZEPIWÓW WYBRANEGO BUDYNKU MIESZKALNEGO

W zastosowanym w pracy sieciowym modelu przepływu płynu węzły sieci mogą reprezentować parametry skupione dla stref wewnątrz budynku (węzły wewnętrzne) - pomieszczeń (np. pokoi), połączeń w sieci instalacyjnej oraz parametry środowiska zewnętrznego (węzły zewnętrzne) [6]. Różnica pomiędzy parametrami fizycznymi poszczególnych węzłów polega na tym, że jedynie dla węzłów wewnętrznych spełnione są równania bilansu masowego. Zazwyczaj ciśnienie w węzle zewnętrznym jest nieznanne. Jednakże, w niektórych

przypadkach parametr ten może być zakładany, jako stały, na przykład w przypadku wykonywania symulacji badania szczelności budynku.

4.1. Dyskretyzacja w przestrzeni

Do przeprowadzenia symulacji wybrano jednokondygnacyjny budynek, który został oddany do użytkowania w 2012 roku (rys. 1). Konstrukcję ścian zewnętrznych wykonano z bloczków silikatowych o grubości 24 cm ocieplonych metodą ETICS od zewnątrz 30 cm warstwą styropianu. Budynek został posadowiony na żelbetowej płycie fundamentowej o grubości 30 cm ocieplonej od spodu 30 cm XPS oraz od góry 15 cm styropianu. Stropodach ma konstrukcję strunobetonową o grubości 20 cm ocieploną od zewnątrz 50 cm styropianu. Okna zewnętrzne umieszczone w ścianach oraz w dachu są 3-szybowe. Powierzchnia ogrzewana oraz przegród zewnętrznych budynku to odpowiednio: 196 m² i 790 m², kubatura wewnętrznej części ogrzewanej wynosi 588 m³.



Rys. 1. Trójwymiarowy model analizowanego budynku.
Fig. 1. Three-dimensional model of the analyzed building.

4.2. Definicja węzłów i komponentów

Węzły w modelu określone są poprzez: rodzaj płynu, typ węzła, wysokość względem punktu odniesienia oraz temperaturę. Dokładny podział węzłów mogących występować w modelu został przedstawiony w tabeli 3. W przypadku modelowania testu szczelności przyjmowane jest rozwiązanie, w którym ciśnienia dla węzła wewnętrznego i zewnętrznego są znane.

Każdy węzeł w sieci ma przypisaną wysokość referencyjną względem określonego jednorazowo dla danego modelu poziomu odniesienia. Wysokość referencyjna znajduje się najczęściej w geometrycznym środku danej strefy, elementu instalacji lub przegrody budynku.

Model sieci jest określony poprzez zdefiniowanie połączeń między poszczególnymi węzłami wewnętrznymi oraz zewnętrznymi (brzegowymi). Następnie sieć jest obliczana poprzez określenie poziomu przepływu powietrza pomiędzy poszczególnymi węzłami, na drodze których rozmieszczone są komponenty determinujące opór przepływu powietrza.

Tabela 2. Rodzaje węzłów sieci przepływów powietrza w modelu [6].

Table 2. Types of air flow nodes in the model [6].

L.p.	Rodzaj węzła	Dane wejściowe, niezbędne do opisu węzła
1	wewnętrzny, dla którego ciśnienie jest nieznanne	brak
2	wewnętrzny, dla którego ciśnienie jest znane	ciśnienie powietrza wewnątrz pomieszczenia
3	zewnętrzny, dla którego ciśnienie jest znane	1. ciśnienie powietrza w środowisku zewnętrznym 2. temperatura powietrza, przy założeniu, że jest: • stała w węźle lub • równa temperaturze powietrza zewnętrznego
4	zewnętrzny, z uwzględnieniem naporu wiatru	1. ciśnienie wiatru 2. azymut (określony w odniesieniu do kierunku północnego)

Założono, że między dwoma węzłami może istnieć więcej niż jedno połączenie. Taka sytuacja ma miejsce na przykład, gdy w danym pomieszczeniu w przegrodzie zewnętrznej występuje kilka nieszczelności. Pomiędzy danym węzłem wewnętrznym (reprezentującym analizowane pomieszczenie), a zewnętrznym należy zdefiniować połączenie odpowiadające każdej z nieszczelności.

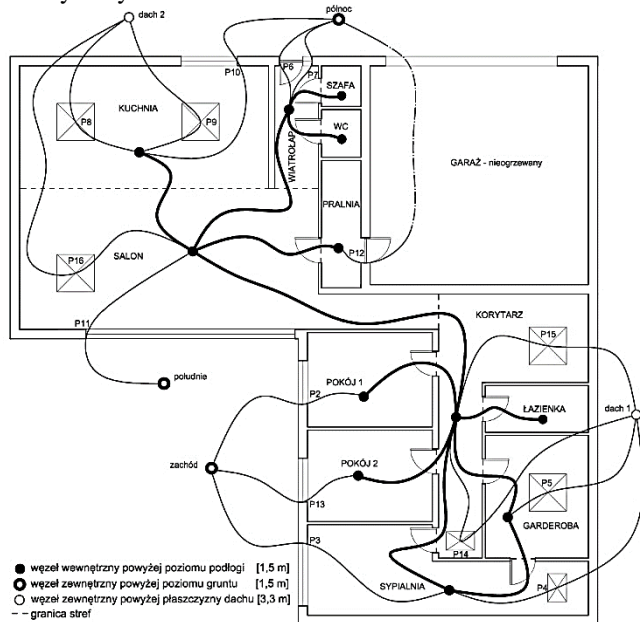
W obliczeniach należy uwzględnić przepływ płynu poprzez połączenia między węzłami sieci. Warunki w węzłach scharakteryzowane są poprzez ciśnienia (wewnętrzne lub zewnętrzne), zaś połączenia poprzez ścieżkę przepływu płynu. Wielkości przepływów zależne są od rodzaju płynu, typu węzłów, rodzaju komponentów oraz wzajemnych powiązań i warunków brzegowych.

Poprawne odwzorowanie modelu przepływu powietrza jest zagadnieniem złożonym. We wszystkich analizowanych budynkach, przyjęto drzwi zewnętrzne oraz rozdzielające pomieszczenia ogrzewane od nieogrzewanych, jako zamknięte (na rzutach - linia ciągła). Drzwi wewnętrzne (rozdzielające strefy ogrzewane w budynku) zostały zdefiniowane, tak jak ma to miejsce w rzeczywistym teście szczelności, jako otwarte. W takim przypadku powietrze między strefami wewnętrznymi może swobodnie przepływać całą powierzchnią otworu drzwiowego oraz może występować dwukierunkowy przepływ powietrza.

4.3. Model budynku i sieci przepływów

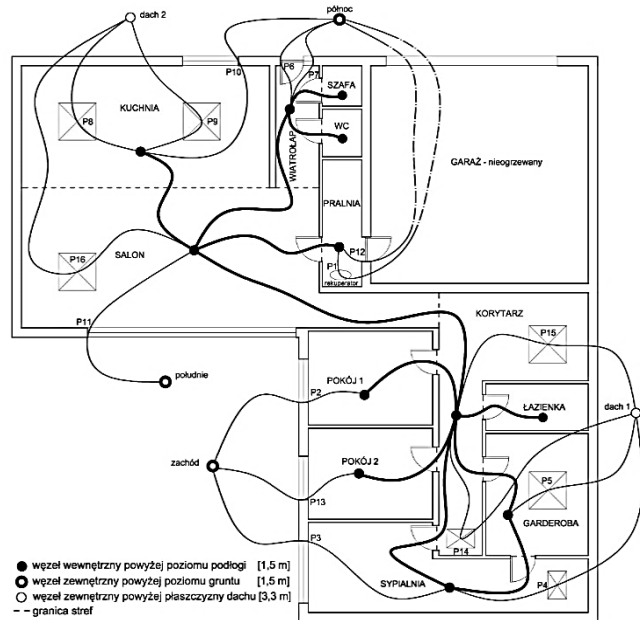
W budynku znajduje się 12 ogrzewanych pomieszczeń, dla których wykonywana była analiza przepływu powietrza. Do obiektu przylega jedno pomieszczenie nieogrzewane (garaż), które nie było brane pod uwagę przy analizie nieszczelności. Rysunek 2 przedstawia ścieżki przepływu

powietrza w modelu teoretycznym, a rysunek 3 w modelu rzeczywistym.



Rys. 2. Model teoretyczny sieci przepływów powietrza przez nieszczelności.

Fig. 2. Theoretical model of the network of airflows through leaks.



Rys. 3. Model rzeczywisty przepływów powietrza przez nieszczelności.

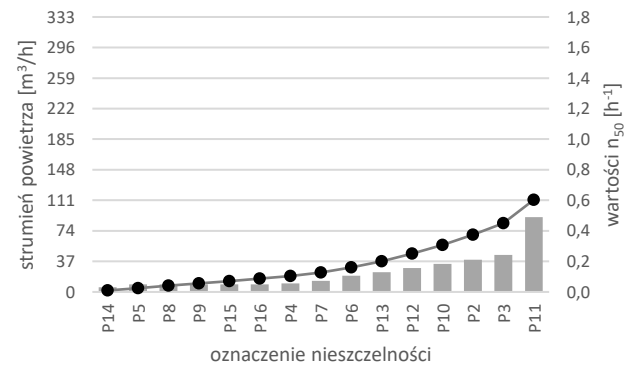
Fig. 3. Real model of airflows through leaks.

Na rzutach budynku (rys. 2 i 3) czarnymi punktami zostały zaznaczone węzły wewnętrzne reprezentujące poszczególne pomieszczenia. Okręgi (o cieńszej oraz grubszej linii) to węzły zewnętrzne, którym przypisano odpowiednią

orientację oraz wysokość nad poziomem odniesienia, który równy jest poziomowi gruntu i jednocześnie górnej powierzchni podłogi parteru.

Na rzutach budynku (rysunek 2 i 3) grubą linią zaznaczono wewnętrzną sieć przepływów pomiędzy ogrzewanymi strefami budynku. Cienkie linie reprezentują drogi infiltracji powietrza przez obudowę budynku, które zostały opisane za pomocą symboli i przedstawione w tabeli 1.

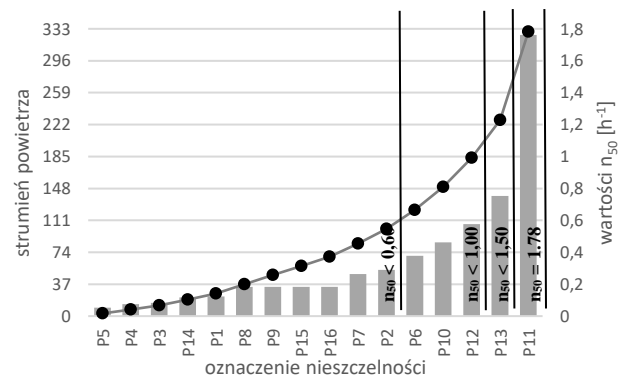
5. SZCZEGÓLWY WYNIKI ANALIZY TESTU SZCZELNOŚCI



Rys. 4. Poziom teoretycznej infiltracji powietrza oraz zmiany wartości n_{50} z podziałem na nieszczelności.

Fig. 4. Level of theoretical air infiltration and changes in the value of n_{50} with leaks division.

W modelu teoretycznym największy strumień powietrza występuje w miejscu oznaczonym P11 (rys. 4). Miejscem infiltracji jest połączenie stolarki okiennej ze ścianą zewnętrzną. Na wykresie (rys. 4) czarnymi punktami zaznaczono wpływ eliminacji poszczególnych nieszczelności na poprawę poziomu szczelności budynku. Eliminacja nieszczelności oznaczonej, jako P11 skutkuje poprawą szczelności do poziomu $n_{50} = 0,45 \text{ h}^{-1}$.



Rys. 5. Poziom rzeczywistej infiltracji powietrza oraz zmiany wartości n_{50} z podziałem na nieszczelności.

Fig. 5. Level of actual air infiltration and changes in value of n_{50} with leaks division.

W modelu rzeczywistym, tak samo jak w teoretycznym największy strumień powietrza infiltrującego występuje w salonie, w miejscu połączenia stolarki okiennej ze ścianą zewnętrzną (P11, rysunek 5). Obliczeniowy przepływ powietrza w warunkach testu szczelności (przez P11) wyniósł 326 m³/h. Przez najmniejsze nieszczelności (P4 i P5) przepływa ponad 20-krotnie mniej powietrza (< 15 m³/h).

Eliminacja nieszczelności P11 skutkuje spadkiem współczynnika n_{50} do poziomu niższego niż 1,5 h⁻¹ (rys. 5). Aby liczba wymian powietrza przez nieszczelności spadła poniżej 1,0 h⁻¹, czyli poziomu wymaganego dla budynków energooszczędnych, dodatkowo należy uszczelnić miejsce oznaczone symbolem P13. Budynek osiągnie szczelność na poziomie określonym dla budynków pasywnych ($n_{50} < 0,6$ h⁻¹) jeżeli wyeliminuje się nieszczelności w miejscach oznaczonych P11, P13, P12, P10 oraz P6.

6. WNIOSKI

W pracy zaproponowano wykorzystanie metody potencjałów węzłowych do symulacji testów ciśnieniowych budynków na etapie projektu oraz po jego wykonaniu. Opisano sposób tworzenia modelu przestrzennego, zdefiniowania komponentów, węzłów oraz całej sieci przepływów dla potrzeb symulacji numerycznych.

Możliwe jest wykonanie numerycznego badania szczelności budynku na podstawie identyfikacji newralgicznych punktów (najczęściej występujących w przypadku danej konstrukcji budynku), w których może występować infiltracja powietrza.

Wyniki z polowego badania szczelności wraz z identyfikacją rzeczywistych miejsc infiltracji różnią się od modelu teoretycznego. W modelu rzeczywistym możliwe jest uwzględnienie większej liczby nieszczelności lub ich wielkości niż to zostało założone w modelu teoretycznym. Wynika to z faktu, iż na etapie wykonawstwa mogą powstać dodatkowe miejsca przecieku powietrza, co może być bezpośrednim skutkiem błędów wykonawczych.

Modelowanie teoretyczne badania szczelności jest przydatnym narzędziem przy projektowaniu danego budynku jednak nie może w pełni zastąpić badania wykonywanego metodą inżynierską.

architectural-construction project (before implementation). In the second one the design is supplemented by the information obtained from the field studies (after implementation). The measurable result of the presented study was to obtain a computer model fully compatible with the real state. As a result of conducted calculations and based on the blower door test, the same level of indicator was obtained $n_{50} = 1.78$ h⁻¹. The proposed method has significant application potential due to the possibility of estimating the tightness of the building at the design stage.

Literatura

- [1] *PN-EN ISO 9972:2015 Ciepłota właściwości użytkowe budynków -- Określanie przepuszczalności powietrznej budynków -- Metoda pomiaru ciśnieniowego z użyciem wentylatora*
- [2] Miszczuk A., „The Level of Airtightness in Energy-efficient Single-family Houses in Polan”, *Procedia Engineering*, 153 (2016) 461-466
- [3] Miszczuk A., Żmijewski K., „Analiza rynku budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię w Polsce,” *Materiały Budowlane*, 1 (2015) 24-27
- [4] Firląg S., Miszczuk A., „Szczelność powietrzna budynków energooszczędnych a instalacje,” *Rynek Instalacyjny*, 4 (2015) 56-62
- [5] Heim D., „Analiza przepływu powietrza przez wentylowane szczeliny pionowe w przegrodach budynku o dużym stopniu ekspozycji,” *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, tom V, zeszyt 1 (2010) 27-30
- [6] Hensen J. L. M., *On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system*, Technische Universiteit Eindhoven, 1991
- [7] Klemm K., „Kompleksowa ocena warunków mikroklimatu w luźnych i zwartych strukturach urbanistycznych,” *Studia z Zakresu Inżynierii Nr 75*, Wyd. Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, nr 75, 2011
- [8] Clarke J., *Energy Simulation in Building Design*, Butterworth-Heinemann, 2001
- [9] Dick J.B., *The Fundamentals of Natural Ventilation of Houses*, I HAVE 18, 1950

MODELING BLOWER DOOR TEST BY BUILDING POTENTIAL METHODS

Summary: In the article the method was described as assessing the airtightness at the stage of a building design. It presents the principles of modelling the air flow in a building using the nodal potentials. To demonstrate that a simulation of the blower door test of selected building was performed. There are two proposed methods to build a network flow and show how to peel the components. The first approach is to analyse the