

Modelowanie wentylacji naturalnej

w dużych obiektach o nierównomiernym rozkładzie zysków ciepła

W obiektach budowlanych o dużej emisji ciepła z procesu technologicznego – np. huty szkła i metali, bloki energetyczne – nadwyżki ciepła są zazwyczaj usuwane przez wentylację naturalną. Ten rodzaj wentylacji, wbrew obiegowej opinii, również wymaga precyzyjnych obliczeń.

Metodyka obliczeń

Są dwie metody obliczania parametrów powietrza – temperatury i różnicy ciśnienia w stosunku do ciśnienia atmosferycznego na zewnątrz budynku:

- obliczenia na wartościach średnich,
- przestrzenna symulacja przepływów strumieni (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) w kubaturze.

Obliczenia wykonywane zgodnie z wzorami mechaniki wyporu grawitacyjnego są stosunkowo proste. Wyniki otrzymuje się dość szybko, ale nie pokazują one lokalnych maksimów temperatury pod dachem.

Symulacja CFD nie ma tej wady, jednak jest nieporównywalnie bardziej pracochłonna. Zbudowanie samego modelu zajmuje od kilku do kilkunastu dni. Do tego dochodzi czas wykonania obliczeń każdego przypadku, co również zabiera od kilku do kilkunastu dni.

Aby porównać wyniki otrzymane za pomocą obu metod, wykonano modelowanie wentylacji dla huty. Do obliczeń na wartościach średnich został użyty program Ventos. Jest to obecnie najbardziej efektywne narzędzie. Używa go większość inżynierów, projektujących bloki energetyczne, huty szkła i metali, a także spalarnie odpadów i wszelkiego typu obiekty, w których niezbędne jest usuwanie nadmiaru ciepła emitowanego do kubatury. Do symulacji CFD został zastosowany licencjonowany program Phoenics Flair jeden z najlepszych programów w tej klasie, stosowany przez profesjonalistów.

Program Ventos służy do obliczania temperatury powietrza pod dachem budynku po wprowadzeniu danych takich jak: zyski ciepła z technologii emitowane do kubatury, wymiary geometryczne budynku oraz usytuowanie i powierzchnie otworów nawiewnych w elewacjach oraz otworów wywiewnych w dachu.

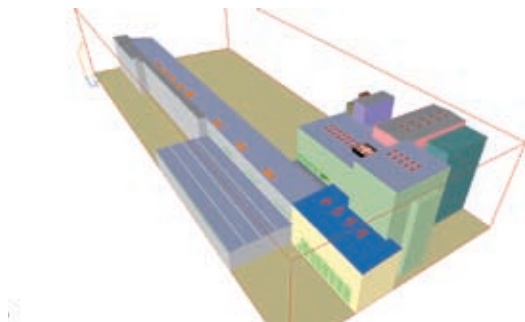
U podstaw teoretycznych programu leżą dwa równania, które w stanie równowagi cieplnej obiektu muszą być spełnione:

- suma energii dostarczanej do wnętrza hali (z procesów technologicznych oraz powietrza wentylacyjnego nawiewanego) musi być równa sumie energii powietrza wywiewanego,
- suma strumieni masowych powietrza nawiewanego musi być równa sumie strumieni masowych powietrza wywiewanego.

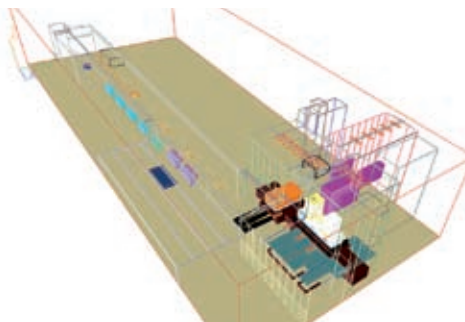
Jedną z istotnych modyfikacji algorytmu znanego z literatury było drastyczne skrócenie czasu obliczeń poprzez zastosowanie wcześniejszej prognozy, w jakim obszarze znajdzie się wynik końcowy. Drugą istotną modyfikacją było uzupełnienie algorytmu o powietrze nawiewane i wyciągane z hali wentylatorami mechanicznymi.

Projektowanie za pomocą programu Ventos ma w pewnym sensie charakter iteracyjny. Projektant wprowadza do programu wymiary geometryczne obiektu, zyski ciepła emitowane do kubatury hali, współczynniki charakterystyczne dla danego typu obiektu oraz powierzchnie i poziom otworów nawiewnych i wywiewnych ze współczynnikami charakterystycznymi dla zastosowanych urządzeń wentylacji naturalnej. Program wykonuje obliczenia w czasie praktycznie niezauważalnym, a rolą projektanta jest taka modyfikacja powierzchni lub/i usytuowania otworów nawiewnych i wywiewnych, aby wynik kolejnych obliczeń był do zaakceptowania pod względem temperatury pod dachem i rozkładu ciśnienia w budynku. Przy pewnej wprawie projektant dochodzi do pożądaných wyników końcowych już po kilku takich „iteracjach”.

Phoenics Flair jest narzędziem do symulacji procesów obejmujących przepływ płynów, ciepła i przenoszenia masy. Program wykorzystuje metody numeryczne rozwiązywania cząstkowych równań różniczkowych, które opisują przepływ płynów. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie dokładnego rozkładu temperatury, ciśnienia i prędkości w przepływie. Pozwala również na przeprowadzenie symulacji w skomplikowanych kubaturach o zróżnicowanych zyskach ciepła rozmieszczonych w poszczególnych częściach obiektu. Program dzieli całą kubaturę na mniejsze komórki i dla każdej z nich liczy parametry przepływających płynów, ciepła i masy. Każdy otwór wentylacyjny w ścianach i na dachu jest scharakteryzowany jego wielkością geometryczną oraz współczynnikiem oporów miejscowych ξ oraz aerodynamicznym współczynnikiem przepływu C_{v0} . Nawiewy i odciąg mechaniczne oraz powietrze wypuszczane na halę są przedstawione w modelu jako strumienie masowe [kg/h]. Parametry powietrza program przelicza w zależności od temperatury jaką ma dany strumień powietrza.



Rys. 1. Model zespołu budynków huty

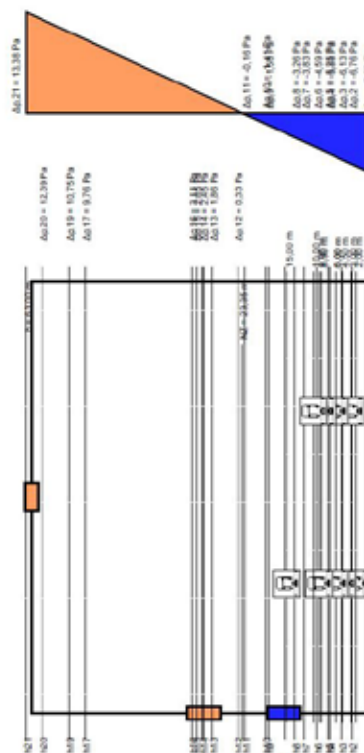


Rys. 2. Źródła ciepła wewnątrz budynków

Klient		ventosystem	
Numer projektu	2015-16	Raport nr 13	
Objekt			
Obszar wentylacji	Cały kompleks, normalna praca		
Uwagi	Lato +32		
Data	19-06-2015		
Obliczenia wykonał	Bohdan Kontrymowicz		
Temperatura zewnętrzna	+32		
Profil temperatury	Brak profilu		
Wymiary główne			
Długość pomieszczenia	l	276	[m]
Szerokość pomieszczenia	b	81,00	[m]
Powierzchnia pomieszczenia	A	22 316	[m ²]
Maksymalna wysokość budynku (kalenica)	h	63,00	[m]
Średnia wysokość pomieszczenia h	av	57,00	[m]
Kubatura hali	VR	1 271 984	[m ³]
Stopień zabudowy pomne iszczenia	VB	0,65	[-]
Kubatura netto	VRN	445 194	[m ³]
Dane meteorologiczne			
Temperatura powietrza nawiewanego	te	32,0	[°C]
Średnia prędkość wiatru	U	0,00	[m/s]
Strumień ciepłoty od urządzeń technologicznych	Q _t	13 450	[kW]
Stopień obciążenia cieplnego pomieszczeń	μT	0,40	[°]
Strumienie ciepłoty od zysków (Ew. strat) zewn.	Q/A	0,00	[kW]
Całkowity strumień ciepłoty	Q _q	13 450	[kW]
Wewn. Ciepłota właściwa wzgl. kubatury netto (powietrza)	Q _l	30,21	[W/m ³]
Temperatury/krotność wymian powietrza			
Temperatura pod dachem	t _{out}	45,5	[°C]
Średnia różnica temperatur powietrza wywiewanego i nawiewanego	Δt _{out}	13,5	[K]
Ilość wymian powietrza	LW	9,10	[1/h]
Wysokość strefy wyrównania ciśnień od posadzki	NZ	23,35	[m]
Suma strumieni objętościowych powietrza nawiewanego i wywiewanego			
Suma strumieni objęto. nawiewu naturalnego	V _{in}	3 199 715	[m ³ /h]
Suma strumieni objęto. wywiewu naturalnego	V _{out}	3 765 515	[m ³ /h]
Suma strumieni objęto. nawiewu mechanicznego	V _{in}	850 000	[m ³ /h]
Suma strumieni objęto. wywiewu mechanicznego	V _{out}	419 000	[m ³ /h]
Suma powierzchni nawiewu/wywiewu			
Otwarta powierzchnia nawiewna (geometryczna)	A _{a, in}	1 243	[m ²]
Otwarta powierzchnia nawiewna (czynna)	A _{a, in}	497	[m ²]
Otwarta powierzchnia wywiewu (geometryczna)	A _{a, out}	1 023	[m ²]
Otwarta powierzchnia wywiewu (aerodynamicznie czynna)	A _{a, out}	510	[m ²]
Wymagana moc nagrzewnic	Q _n	0,00	[kW]

Program VENTOS do obliczenia wentylacji naturalnej Ventos_Profil_9.0
Copyright ©2010 VENTOSYSTEM Bohdan Kontrymowicz, www.ventosystem.pl

Raport NR 13
Strona 1/9



Program VENTOS do obliczenia wentylacji naturalnej Ventos_Profil_9.0
Copyright ©2010 VENTOSYSTEM Bohdan Kontrymowicz, www.ventosystem.pl

Raport NR 13
Strona 1/9

Rys. 3. Pierwsza strona z raportu wykonanego w programie Ventos

Modelowanie układu wentylacji

W projekcie wykonywanym na potrzeby huty zdecydowano się na wykorzystanie obu metod, aby każda z nich, w obszarze wielkości możliwych do porównania, weryfikowała metodę drugą. Analizowany obiekt budowlany pokazuje rys. 1.

Efekt obliczeń wentylacji za pomocą programu Ventos jest raport zawierający zestawienie wprowadzonych przez projektanta wymiarów obiektu, danych temperaturowych i powierzchni otworów nawiewnych i wywiewnych oraz jako wynik obliczeń temperaturę pod dachem i sumę strumieni nawiewnych i wywiewnych zarówno dla wentylacji naturalnej, jak i mechanicznej. Raport pokazuje ponadto wyliczenia parametrów strumieni w każdej grupie identycznych otworów na tej samej wysokości (rys. 3), a na końcu schemat graficzny budynku z przybliżonym gradientem ciśnienia wewnątrz kubatury (rys. 4).

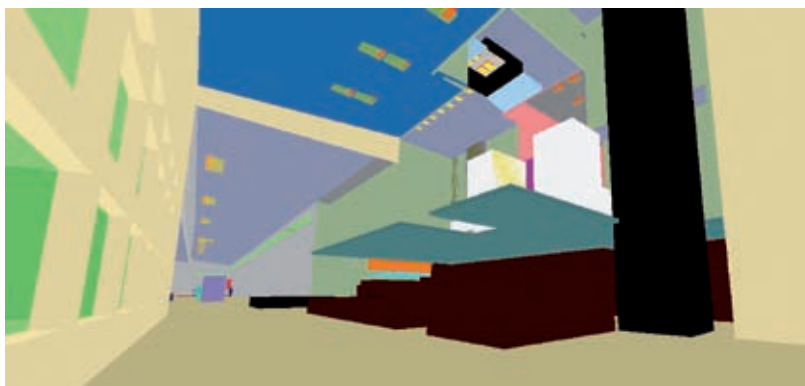
Rys. 4. Ostatnia strona raportu wykonanego w programie Ventos

Sprawdzenie układu połączonych ze sobą hal o różnych wysokościach do jednego równoważnego prostopadłościanu wymaga dużego doświadczenia projektanta.

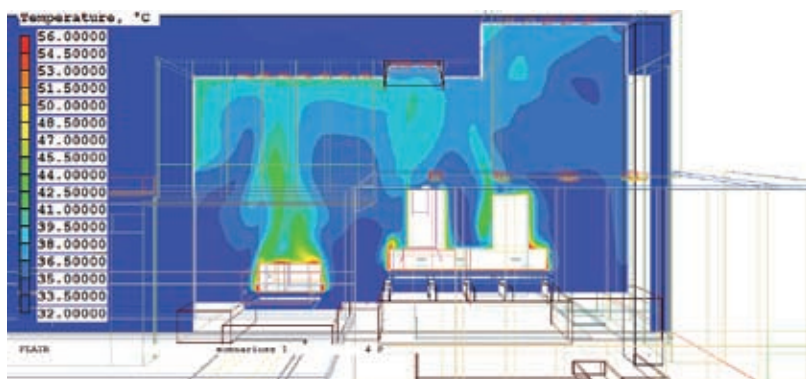
Wyniki modelowania za pomocą Phoenics Flair są oczywiście dużo bardziej spektakularne, ponieważ pokazują:

- przestrzenny rozkład strumieni powietrza wentylacyjnego w kubaturze hal,
- przestrzenny rozkład ciśnienia w kubaturze hal,
- przestrzenny rozkład temperatury powietrza w kubaturze hal,
- rozkład temperatury pod dachami poszczególnych hal,
- kształt i parametry strumienia powietrza wydostającego się na halę podczas procesów technicznych.

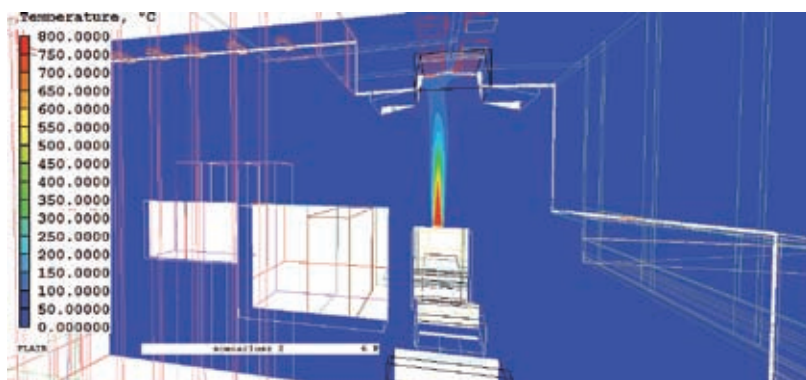
Analizowany model obejmował istniejące 5 hal a modelowane obiekty zostały przedstawione jako połączone bryły geometryczne, co pozwoliło również uzyskać rozkład tem-



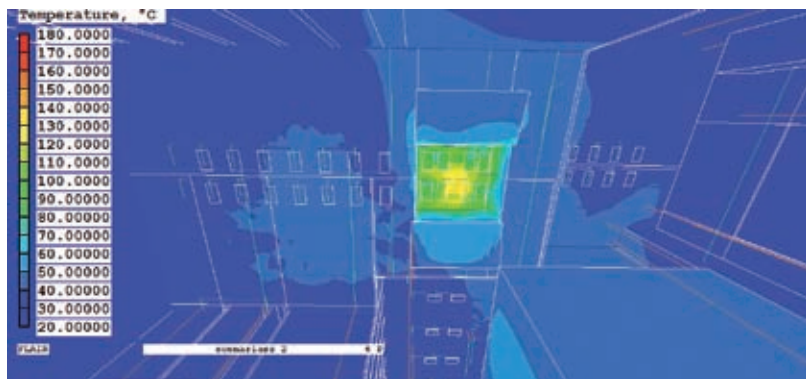
Rys. 5. Źródła ciepła wewnątrz hali



Rys. 6. Wynik modelowania temperatury w przekroju przez dwa piece dla scenariusza nr 1 – normalna praca latem (temp. zewn. +32°C)



Rys. 7a. Wynik modelowania temperatury w przekroju przez hale dla scenariusza nr 2. – praca przy dachu zamkniętym



Rys. 7b. Wyniki modelowania temperatury na powierzchni dachów nad piecem dla scenariusza nr 2. – praca przy dachu zamkniętym

peratury, ciśnienia i prędkości w trzech wymiarach. Program umożliwia również przestrzenne przedstawienie źródeł ciepła, które odpowiadają za powstanie ciągu konwekcyjnego.

Działanie instalacji i scenariusze obliczeń

Projekt zawierał cztery scenariusze działania instalacji i technologii:

- 1) scenariusz nr 1 zakłada pracę systemu wentylacji przy temperaturze zewnętrznej +32°C, przy jednoczesnym działaniu wszystkich urządzeń technologicznych,
- 2) scenariusz nr 2 zakłada pracę systemu wentylacji hal przy temperaturze zewnętrznej +32°C, przy zamkniętym ruchomym dachu i jednoczesnym rozpoczęciu okresowego procesu technicznego, kiedy gazy z pieca wydostają się do hali,
- 3) scenariusz nr 3 zakłada pracę systemu wentylacji przy temperaturze zewnętrznej -20°C, przy jednoczesnym działaniu wszystkich urządzeń technologicznych,
- 4) scenariusz nr 4 zakłada pracę systemu wentylacji hal przy temperaturze zewnętrznej +32°C, przy otwartym ruchomym dachu i jednoczesnej końcowej fazie okresowego procesu technicznego.

Scenariusz nr 1 (rys. 6) może występować maksymalnie kilkanaście dni w roku – determinuje on wymiarowanie instalacji wentylacji naturalnej. Dla zachowania jak najniższej temperatury pod dachem w obliczeniach przyjęto pełne otwarcie wszystkich urządzeń wentylacyjnych (czerpni, wyrzutników dachowych oraz wyrzutni ściennych).

Scenariusz nr 2 (rys. 7a i 7b) zdarza się sporadycznie. W tym wypadku otwarte pozostają wyrzutniki umieszczone na dachu przesuwnym ponad wygrzewanym piecem oraz pozostałe wyrzutniki umieszczone na dachach hal oraz wszystkie czerpnie i wyrzutnie ścienne powietrza. Zakłada się jednoczesne działanie odciągów miejscowych z maszyn i pieców. Rozpatrując scenariusz nr 2, należy zwrócić szczególną uwagę na maksymalną dopuszczalną temperaturę pod dachem hali oraz na lokalne wzrosty temperatury spowodowane bezpośrednim oddziaływaniem gorących gazów.

Scenariusz nr 3 został opracowany dla okresu zimowego. Dla zminimalizowania wpływu mroźnego powietrza napływającego do hal założono, że otwarte pozostają jedynie wyrzutniki umieszczone na dachu przesuwnym oraz wszystkie czerpnie w halach istniejących. Scenariusz nr 3 nie wpływa na dobór urządzeń systemu wentylacji naturalnej – ma jedynie wpływ na prawidłowe wytyczne do systemu sterowania.

Scenariusz nr 4 (rys. 8a i 8b) także zdarza się sporadycznie. W scenariuszu nr 4 otwarty pozostaje dach przesuwny nad piecem w końcowej fazie procesu, wszystkie wyrzutniki umieszczone na dachach hal kompleksu oraz wszystkie czerpnie i wyrzutnie ścienne powietrza.

Odciąg miejscowy maszyn są wyłączone, czynne pozostaje jedynie chłodzenie pieców. Rozpatrując scenariusz nr 4 (podobnie, jak w scenariuszu nr 2) należy szczególną uwagę zwrócić na maksymalną dopuszczalną temperaturę

pod dachem hali oraz na lokalne wzrosty temperatury spowodowane bezpośrednim oddziaływaniem gorących gazów wyrzucanych z pieca w końcowej fazie procesu.

Z uwagi na połączone kubatury budynków obliczeń dokonano, traktując system wentylacji naturalnej jako wspólny dla wszystkich obiektów (przepływ powietrza pomiędzy obiektami nie jest utrudniony, zależy jedynie od rozkładu różnicy ciśnienia w poszczególnych strefach budynków w stosunku do ciśnienia atmosferycznego na zewnątrz).

Z tego samego powodu w programie Ventos nie zadano profilu, który obecnie można wybierać dla kotłowni, dla hali pieca lub dla maszynowni w bloku energetycznym.

Z uwagi na ograniczone możliwości aranżacyjne czerpnie powietrza wentylacyjnego umieszczono w różnych budynkach i na różnych wysokościach od najniższej +2,80 m do najwyższej +32,8 m. Na dachach obiektów zostały rozmieszczone wywietrzaki typu klapowego (Heatmover-S).

Podstawowym założeniem do obliczeń za pomocą programu Ventos było nieprzekroczenie maksymalnej, dopuszczalnej temperatury pod dachem dla konstrukcji stalowej obiektu (+80°C). Obliczenia miały również pokazać rozkład ciśnień w obiekcie oraz wysokość linii wyrównania ciśnień (NZ).

Analiza CFD została wykonana na podstawie szczegółowego rozkładu źródeł ciepła na określonych wysokościach w poszczególnych obiektach i miała za zadanie uszczegółowienie rozkładu temperatur w obiektach, ze szczególnym uwzględnieniem stanu wygrzewania pieca (sprawdzenie wielkości lokalnych przekroczeń temperatury dopuszczalnej).

Z obliczeń objętych metodami dla scenariusza nr 1 wynika, że temperatura pod dachem nigdzie nie została przekroczona i przy pełnym otwarciu wszystkich czerpni i wywietrzaków wynosi średnio 45,5°C pod najwyższym położonym dachem hali pieca. Oczywiście w innych częściach tego kompleksu hal mogą się zdarzyć wyższe temperatury nawet na niższych wysokościach, jeśli wystąpi tam lokalnie emisja dużej ilości ciepła. Takie lokalne wartości maksymalne temperatury pod dachem nie są możliwe do ustalenia za pomocą programu Ventos wykonującego obliczenia na wartościach średnich. Stwierdzono, że ta część żaluzji, które są zlokalizowane wysoko (żaluzje stałe w istniejących halach i żaluzje ruchome w niektórych halach) stają się otworami wywiewnymi.

Z wyników obliczeń dla scenariusza nr 2 wynika, że jest najbardziej niebezpieczny dla konstrukcji dachu z uwagi na lokalną dużą i długotrwałą emisję ciepła od gazu wydobywającego się z pieca. Spaliny uchodzą bezpośrednio do hali i są odprowadzane z hali przez wywietrzaki przy zamkniętym dachu. Z powodów opisanych wcześniej Ventos nie może ustalić lokalnej temperatury pod dachem w tym miejscu. Jest to najważniejszy powód do zastosowania symulacji CFD. Średnia wartość temperatury pod dachem wzrasta przy tym scenariuszu do 49,2°C.

W projekcie przyjęto do obliczeń dla scenariusza nr 3, tj. dla normalnej pracy w zimie przy temperaturze zewnętrznej

-20°C, że użytkownik dopuszcza ujemną temperaturę wewnątrz hal i nie stawia przed projektantami dodatkowych wymagań do spełnienia w tym zakresie.

Obliczana przez program Ventos temperatura powietrza pobieranego mechanicznie na wysokości ok. 2 m od posadzki przez odciąg z maszyny odlewniczej wynosi około -8°C. Jest to, jak wszędzie w programie, wartość średnia na tej wysokości dla całej analizowanej powierzchni hali. W rzeczywistości w różnych punktach obiektu na tym poziomie będą różne temperatury – miejscami wyższe, a miejscami niższe. W zimie powietrze do chłodzenia pieców jest pobierane z wnętrza hali. Pomimo ujemnych temperatur na zewnątrz i lokalnie wewnątrz hal, 8 wywietrzaków na dachu przesuwym pozostaje stale otwartych.

W scenariuszu obliczeń nr 4 otrzymano wyniki następujące: średnia temperatura pod dachem wynosi 52,7°C, ale w miejscu dachu ponad otworem z emisją gazów z pieca będą osiągnięte wartości do 80°C.

Wnioski

Rozkład temperatur

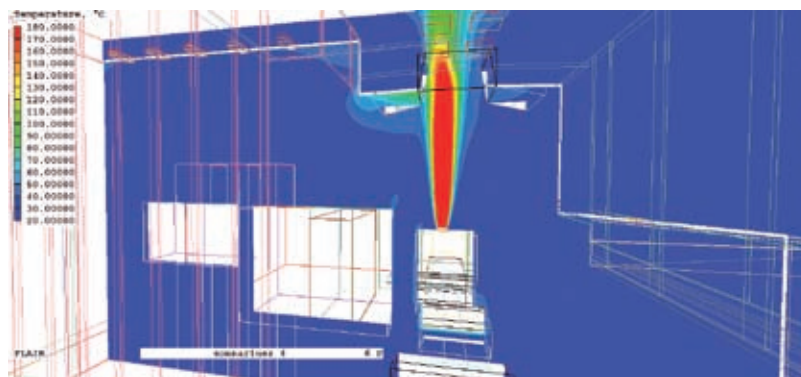
W żadnym scenariuszu dopuszczalna, maksymalna temperatura pod dachem nie osiąga wartości granicznej tj. **+80°C**.

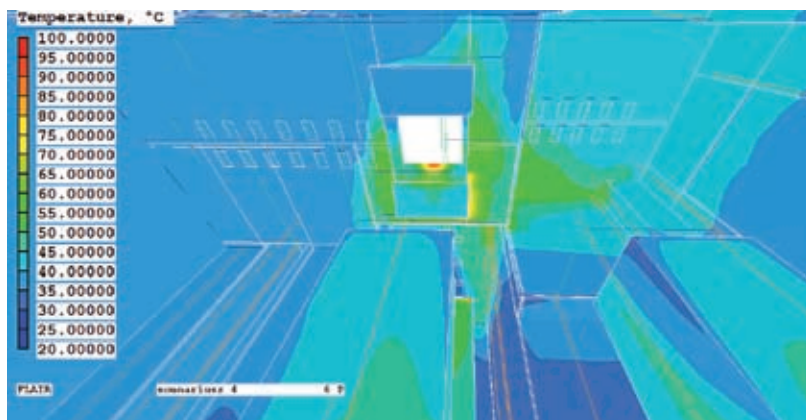
Najwyższa temperatura średnia pod dachem pojawia się przy scenariuszu nr 4 i wynosi: **+ 52,7°C**.

W poszczególnych scenariuszach obliczanych za pomocą programu Ventos wartości wynoszą odpowiednio: nr 1 +45,5°C, nr 2 +49,2°C, nr 3 +9,7°C i nr 4 +52,7°C.

W scenariuszu nr 3 (normalna praca zimą) założono zamknięcie wszystkich otworów nawiewnych i wywiewnych w nowoprojektowanym kompleksie (za wyjątkiem stale otwartych wywietrzaków w dachu przesuwym) i doprowadzanie powietrza wentylacyjnego tylko poprzez czerpnie umieszczone w istniejących halach. Pozwala to na osiągnięcie dodatniej temperatury pod dachem obiektu przy obliczeniowej temperaturze powietrza zewnętrznego tj. -20°C. Zainstalowane w istniejących obiektach czerpnie nie mają możliwości otwierania i zamykania co jest powodem znacznego wyziębienia hali podczas ujemnych temperatur zewnętrznych. Wartości maksymalne temperatur pod dachami obiektu, z wyłączeniem obszaru pod dachem przesuwym, obliczone za pomocą ana-

Rys. 8a. Wynik modelowania temperatury w przekroju (górny limit skali temperatury ograniczono do wartości 180°C, a wartości temperatury gazów powyżej 180°C także pokazane są w kolorze czerwonym) dla scenariusza nr 4. – praca przy dachu otwartym





Rys. 8b. Przedstawia wyniki modelowania temperatury na powierzchni dachów nad piecem dla scenariusza nr 4. – praca w końcowej fazie procesu i przy dachu otwartym

Wykonywanie obliczeń, wymiarowanie wentylacji i weryfikacja jest zadaniem nietrywialnym i odpowiedzialnym, stąd należy przypomnieć wymaganie posiadania niezbędnych uprawnień budowlanych jakie wprowadził ustawodawca w polskich przepisach budowlanych tj. w tzw. „prawie budowlanym” (m.in. Dz.U. z 2006r nr 156, poz. 1118, z póź. zm.) w rozdziale 2, artykule nr 12:

– ust. 1: „**Za samodzielną funkcję techniczną** w budownictwie uważa się działalność związaną z koniecznością fachowej **oceny zjawisk technicznych lub samodzielnego rozwiązywania zagadnień architektonicznych i technicznych** oraz techniczno-organizacyjnych, (...)”

– ust. 2: „**Samodzielne funkcje techniczne** w budownictwie, określone w ust.1 pkt.1–5, **mogą wykonywać wyłącznie osoby posiadające** odpowiednie wykształcenie techniczne i praktykę zawodową (...) stwierdzone decyzją, zwaną dalej „**uprawnieniami budowlanymi**”, wydaną przez organ samorządu zawodowego”.

Dotyczy to także symulacji CFD, które zakresem i formą spełniają cel (definicję) oceny zjawisk technicznych (fizycznych) i rozwiązują zagadnienia techniczne (fizyczne).

Wykonywanie takich odpowiedzialnych zadań przez osoby nie posiadające uprawnień budowlanych mogą być podstawą do niewypłacenia przez ubezpieczyciela odszkodowania właścicielowi – użytkownikowi obiektu w przypadku wystąpienia problemów technicznych, ale także w przypadku pożaru, kiedy obliczenia i weryfikacja projektowa dotyczyłaby systemów pożarowych.

lizej CFD wynoszą odpowiednio: nr 1 +44°C, nr 2 +50°C, nr 3 +20°C i nr 4 +55°C.

W scenariuszach 2 i 4 dochodzi do lokalnych przekroczeń temperatury dopuszczalnej pod dachem. Podczas procesu przy dachu otwartym tj. w scenariuszu nr 4 – temperatura wynosi 90°C na powierzchni kierownic otworu otwartego dachu. Analiza CFD wykazuje temperaturę 80°C pod dachem obok kierownic, ale tej wartości nie przekracza. Podczas procesu przy dachu zamkniętym tj. w scenariuszu nr 2 – temperatura powietrza wywiewanego przez wywiewzaki na dachu przesuwym dochodzi do 140°C.

Przewidywane w projektach lokalne zabezpieczenia konstrukcji dachu okazały się nieodzwonne.

Rozkład ciśnień

Maksymalne wartości ciśnień w obiektach dla scenariuszy 1,2,3,4 nie przekraczają:

- nadciśnienie pod dachem + 76 Pa
- podciśnienie przy poziomie 0,00 m – 22 Pa

Powyższe wartości zostały wyznaczone przez CFD bez uwzględnienia nieszczelności na wszystkich urządzeniach nawiewnych i wywiewnych oraz infiltracji.

Średnia wysokość linii wyrównania ciśnień w obiekcie znajduje się na poziomie od + 23,0 m do + 24,5 m (dla scenariusza nr 4).

Uzyskane wartości średnie temperatur pod dachem oraz wartości podciśnienia w przyziemiu w programie Ventos i w analizie CFD są zbliżone do siebie i wzajemnie się potwierdzają. Różnice między nimi nie stanowią żadnego zagrożenia dla bezpieczeństwa eksploatacyjnego instalacji.

*Bohdan Kontrymowicz, VENTOSYSTEM
Marek Magdziarz, Wentylacja Strumieniowa*

REKLAMA

MODELOWANIE CFD

Symulacje CFD z wykorzystaniem profesjonalnego oprogramowania PHOENICS FLAIR dla modelowania zadymienia i działania instalacji tryskaczowych w warunkach pożaru i ewakuacji.

WENTYLACJA STRUMIENIOWA MAREK MAGDZIARZ
ul. MAGNACKA 7 lok. 39, 02-496 WARSZAWA
tel. 607-324-445, email: marek.magdziarz@wentylacja-strumieniowa.com.pl