

Sylwia SZCZEŚNIAK, Edward PRZYDRÓŻNY, Aleksander PEŁECH,  
Juliusz WALASZCZYK\*

## **ROZKŁAD TEMPERATURY POWIETRZA W NIEWENTYLOWANEJ HALI TECHNOLOGICZNEJ**

W artykule zwrócono szczególną uwagę na rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu wysokim, w którym odbywa się proces technologiczny ze znacznym wydzielaniem ciepła. Scharakteryzowano wyniki pomiarów i obliczeń rozkładu temperatury na różnych wysokościach dla wybranych dni w październiku i grudniu. W sposób graficzny przedstawiono obciążenia cieplne pomieszczenia dla charakterystycznych okresów w cyklu rocznym. Dla zobrazowania zmiany temperatury na różnych wysokościach przedstawiono wykresy z rozkładem dobowym oraz z rozkładem wielodniowym. Artykuł powstał w ramach grantu nr N N523 748040 „Gradient temperatury powietrza w pomieszczeniach wentylowanych mechanicznie w systemach wentylacji mieszającej”

### 1. WSTĘP

W pracy podjęty został temat kształtowania się temperatury powietrza w pomieszczeniu wysokim. Powszechnie znane jest zjawisko gradacji temperatury powietrza w pomieszczeniu. Jednak nie jest ono opisane w sposób wystarczający, szczególnie w odniesieniu do rozkładu temperatury ponad strefą pracy. Właściwe określanie przyrostu temperatury ponad strefą przebywania ludzi ma znaczący wpływ na obliczanie strumienia powietrza wentylującego. Od lat temat ten pozostaje na dalszym planie. Podstawowym celem wentylacji jest zapewnienie właściwych warunków powietrza w pomieszczeniu dla ludzi lub procesów technologicznych. Wszelkiego rodzaju badania, obliczenia i symulacje ukierunkowane są jedynie na strefę pracy. Powoduje to często wymiarowanie instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych z „zapasem bezpieczeństwa”, a to zwiększa koszty eksploatacyjne i inwestycyjne.

---

\* Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, ul. K. Norwida 4/6, 50-373 Wrocław, sylwia.szczesniak@pwr.edu.pl

Strumień powietrza wentylującego ( $V$  w  $\text{m}^3/\text{s}$ ) pomieszczenia o dominującym obciążeniu cieplnym oblicza się ze wzoru:

$$V = \frac{Q_{z\text{bj}}^{\text{max}}}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta t} \quad (1)$$

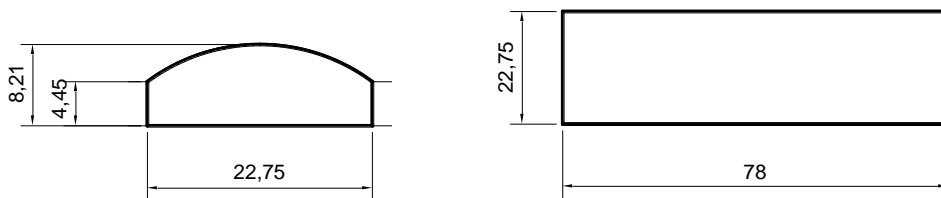
gdzie:  $Q_{z\text{bj}}^{\text{max}}$  - maksymalna wartość bilansu ciepła jawnego w pomieszczeniu, w kW;  $\rho$  - gęstość powietrza, w  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$  - ciepło właściwe powietrza, w  $\text{kJ}/\text{kgK}$ ;  $\Delta t$  - przyrost temperatury powietrza pomiędzy strefą nawiewu i wywiewu powietrza z pomieszczenia, w K.

Problem prawidłowego przyjęcia przyrostu temperatury powietrza - często przyjmowanego na zaniżonym poziomie - skutkuje zwiększonym strumieniem powietrza wentylującego. Poznanie zjawiska, szczególnie od strony pionowego rozkładu temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz wpływu poszczególnych źródeł zysków i strat ciepła ma znaczenie w procesie właściwego określania przyrostu temperatury powietrza w pomieszczeniu.

### 1.1. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

Hala technologiczna zlokalizowana jest w północnej części Wrocławia. Ściany zewnętrzne hali produkcyjnej wykonane są z bloczków gazobetonowych bez dodatkowej warstwy ocieplenia i mają grubość 55 cm. Dach hali, zaprojektowany w formie fragmentu pobocznic walca obrotowego, wykonano w konstrukcji stalowej. Hala posiada tylko dwie przegrody zewnętrzne: dach oraz jedną ścianę - od strony wschodniej. W dachu zamontowano 4 świetliki łukowe o wymiarach  $3 \times 10$  m, wykonanych z materiałów o ograniczonej przepuszczalności promieniowania słonecznego. W ścianie zewnętrznej (w części bocznej hali) zlokalizowana jest dodatkowo brama podnoszona o wymiarach  $2,6 \times 3,3$  m. Podłoga w hali jest położona na gruncie. W omawianej hali nie ma żadnej wentylacji mechanicznej.

W miejscach styku dachu i ścian zamontowano 26 lamp jarzeniowych. Ponadto, nad ciągami komunikacyjnymi w przestrzeni podstropowej zamontowane 24 lampy halogenowe. W pomieszczeniu pracują 54 wtryskarki o wymiarach  $4,3 \times 1,2 \times 2,0$  m. W hali pracuje maksymalnie 18 osób obsługujących wtryskarki. Charakterystykę geometryczną hali przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Podstawowe wymiary geometryczne hali (w metrach)

## 1.2. CHARAKTERYSTYKA CIEPLNA HALI

Dla rozpatrywanej hali wykonano obliczenia obciążenia ciepłem jawnym w okresie ciepłym i zimowym. Obliczenia dla lata wykonano dla miesięcy reprezentatywnych tego okresu (lipiec i wrzesień). Dla okresu zimowego obliczono obciążenie cieplne pomieszczenia dla różnych temperatur powietrza zewnętrznego. Do obliczeń wykorzystano metodę opisaną w [3]. Wyznaczenie obciążenia pomieszczenia ciepłem jawnym w skrajnych porach roku pozwala na wstępną ocenę rozwarstwiania temperatury powietrza na wysokości hali.

Na bilans cieplny pomieszczenia składają się zyski i straty ciepła od poszczególnych źródeł. Zgodnie z podaną w literaturze metodą obliczeniową w bilansie okresu letniego nie uwzględniano strat ciepła przez ściany i stropodach. Źródłami wpływającymi na obciążenie cieplne pomieszczenia są zyski ciepła przez przegrody nieprzezroczyste  $Q_{pn}$  (ściany i dach), zyski ciepła przez przegrody przezroczyste  $Q_{pp}$ , zyski ciepła od oświetlenia elektrycznego  $Q_{ośw}$ , zyski ciepła jawnego od technologii  $Q_{jT}$ , oraz zyski ciepła jawnego od ludzi  $Q_{jL}$ . W okresie zimowym nie uwzględnia się zysków ciepła przez przegrody zewnętrzne, ale uwzględnia się statyczne straty ciepła  $Q_{str}$  - wynikające z różnicy temperatury pomiędzy powietrzem w pomieszczeniu a powietrzem zewnętrznym.

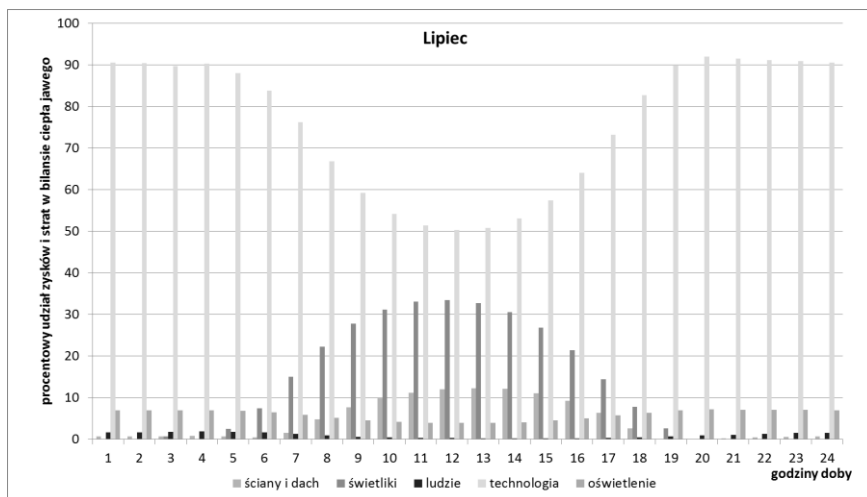
Bilans ciepła jawnego pomieszczenia dla okresu letniego, obliczono na podstawie wzoru:

$$Q_{zbj(oc)} = Q_{pn(oc)} + Q_{pp(oc)} + Q_{ośś(oc)} + Q_{jT(oc)} + Q_{jL(oc)} \quad (2)$$

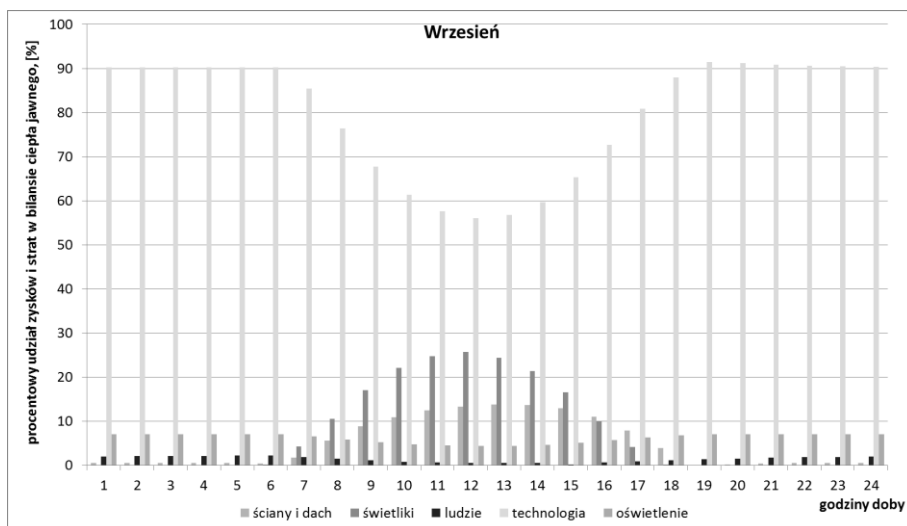
Bilans ciepła jawnego pomieszczenia dla okresu zimowego, obliczono korzystając z zależności:

$$Q_{zbj(oz)} = Q_{ośś(oz)} + Q_{jT(oz)} + Q_{jL(oz)} - Q_{str} \quad (3)$$

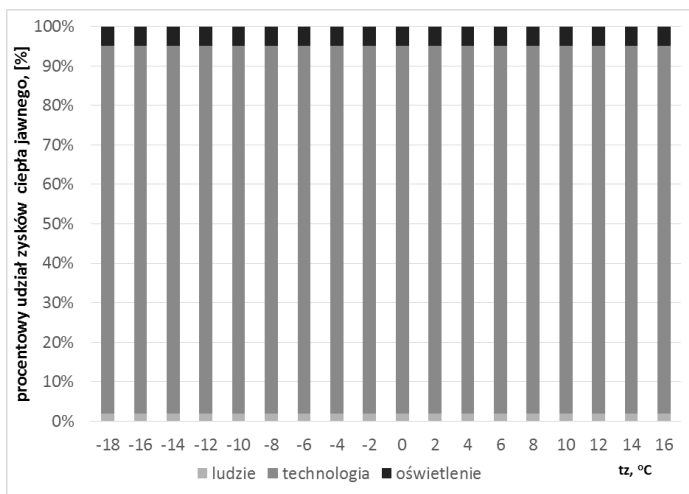
Na zamieszczonych wykresach (rys. 2-5) przedstawiono udział poszczególnych składników w bilansie ciepła pomieszczeń zarówno w odniesieniu do okresu letniego jak i zimowego.



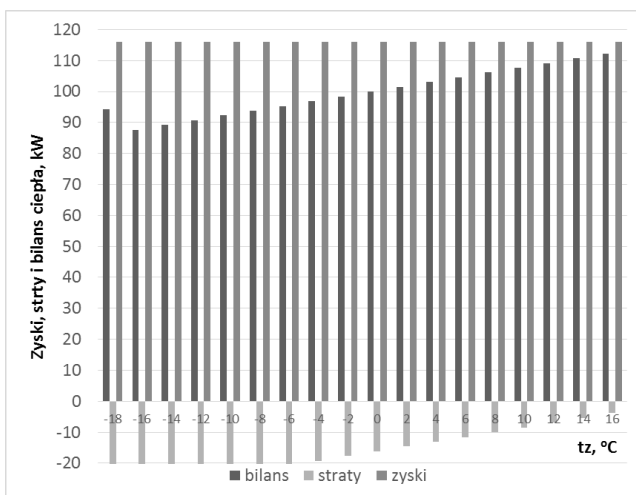
Rys. 2. Udział poszczególnych źródeł ciepła w bilansie ciepła jawnego okresu ciepłego - w lipcu



Rys. 3. Udział poszczególnych źródeł ciepła w bilansie ciepła jawnego okresu ciepłego - we wrześniu



Rys. 4. Udział poszczególnych źródeł ciepła dla pomieszczenia w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego



Rys. 5. Udział poszczególnych źródeł zysków i strat ciepła dla pomieszczenia w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego

Z wykresów wyraźnie wynika, że w każdej porze roku zyski ciepła od technologii są zyskami dominującymi, mającymi decydujący wpływ na całkowite obciążenia cieplne pomieszczenia. Pozostałe źródła, w tym zyski ciepła przez świetliki, mają nieznaczny wpływ na bilans ciepła. Przy pracy wszystkich maszyn zyski ciepła od

technologii przekraczają 80-90%. Tylko w czasie występowania największego natężenia promieniowania słonecznego (wrzesień i lipiec w godzinach południowych) wpływ ciepła od technologii na całkowity bilans jest mniejszy, jednak nie spada poniżej 50%. Ponadto zwrócić uwagę należy na to, że świetliki zlokalizowane są w górnej części pomieszczenia, zatem w przypadku, kiedy hala nie jest wentylowana, a co za tym idzie nie ma w niej zorganizowanego przepływu powietrza, znaczne natężenie słoneczne powinno wpływać głównie na zmianę temperatury w najwyższej części hali.

## 2. ROZKŁAD I GRADIENT TEMPRATURY POWIETRZA W POMIESZCZENIU PONAD STREFĄ PRACY

Rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu określano mierząc temperaturę powietrza na różnych wysokościach ponad strefą pracy. W hali maszyn, zamontowano dwa słupy pomiarowe z 8 sondami pomiarowymi, montowanymi w rozstawie co 60 cm. Na każdym słupie pomiarowym jedna z sond zawsze pozostawała w strefie pracy. Do pomiarów rozkładu temperatury na wysokości w hali używano sondy Pt1000. Najwyższa sonda pomiarowa zamontowana była na wysokości  $h_7 = 7$  m nad podłogą hali natomiast sonda w strefie pracy zamontowana była na wysokości  $h_{2,2} = 2,2$  m.

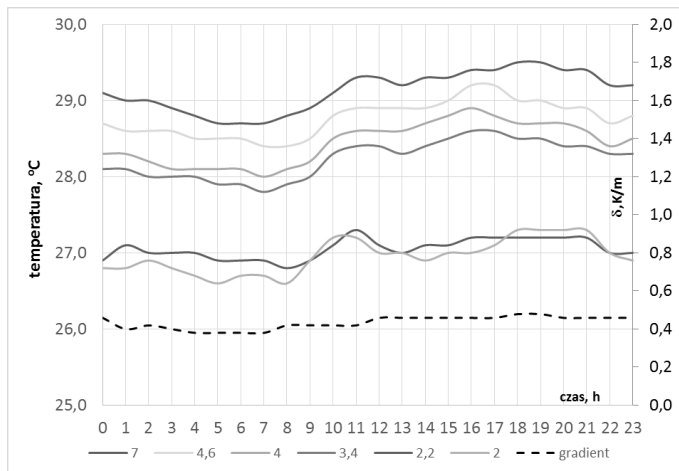
Gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu zwykle wyraża się w K/m i można go obliczyć ze wzoru:

$$\delta = \frac{t_7 - t_{2,2}}{h_7 - h_{2,2}} \quad (4)$$

gdzie:  $t_7$  i  $t_{2,2}$  - temperatury powietrza na wysokości  $h_7 = 7$  m i  $h_{2,2} = 2,2$  m.

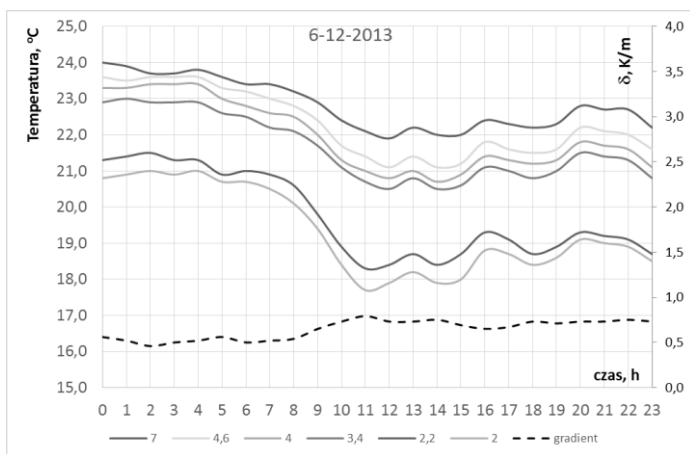
Na rysunkach 6-9 przedstawiono wykresy obrazujące dobowy rozkład temperatury powietrza na różnych wysokościach oraz obliczony gradient temperatury powietrza ponad strefą pracy. Dla zobrazowania zmienności temperatury na wysokości hali oraz gradientu temperatury od strefy pracy do wysokości 7 m wybrano typowy dzień (17.10.2013 r.), reprezentujący przeciętną zmienność temperatury i gradientu oraz dni graniczne, tj. dni, w których obserwowano maksymalny oraz minimalny gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu.

W wyniku analizy przeprowadzonych pomiarów zauważono, że średni gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu wynosi ok. 0,5 K/m. Odnosi się to do dni, w których nie ma ograniczenia liczby pracujących na hali maszyn.



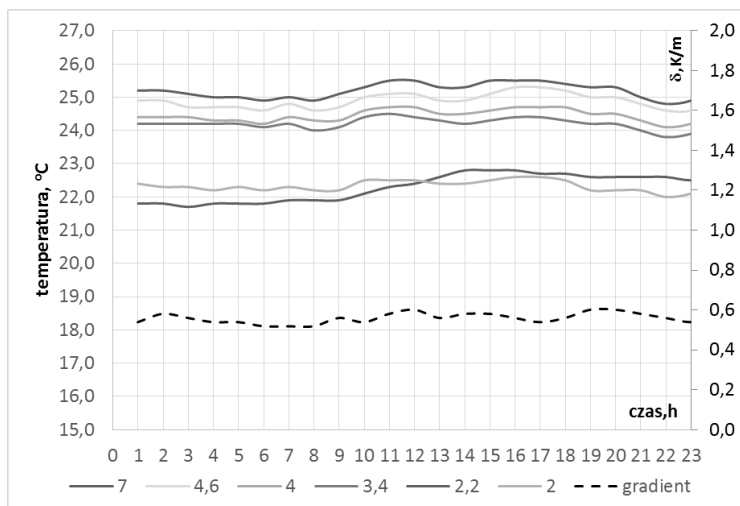
Rys. 6. Rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu w dniu 17.10.2013 r. dla 6 różnych wysokości oraz gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu w funkcji czasu

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład temperatury powietrza w dniu, w którym widać wyraźny spadek temperatury powietrza w strefie pracy. Ma to wpływ na rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz na wzrost gradientu. Na wykresie widać, że spadek temperatury w strefie pracy pociąga za sobą również obniżenie temperatury ponad tą strefą bez wyraźnego przesunięcia czasowego, co świadczy o niewielkim wpływie akumulacji ciepła na rozkład temperatury. Obniżenie temperatury w strefie pracy związane było z ograniczeniem liczby działających maszyn na hali.



Rys. 7. Rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu w dniu 6.12.2013 r. dla 6 różnych wysokości oraz gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu w ciągu doby

Na rysunku 8 przedstawiono rozkład temperatury powietrza w dniu, w którym ponownie występuje ukształtowany gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu na średnim poziomie 0,5 K/m. Warto zwrócić uwagę na fakt, iż temperatura w strefie pracy jest praktycznie stała i wynosi ok. 21÷22 °C. Obniżenie temperatury powietrza w stosunku do temperatury z dnia 17.10.2013 jest efektem wpływu strat ciepła, wynikających z niskich wartości temperatury powietrza zewnętrznego.

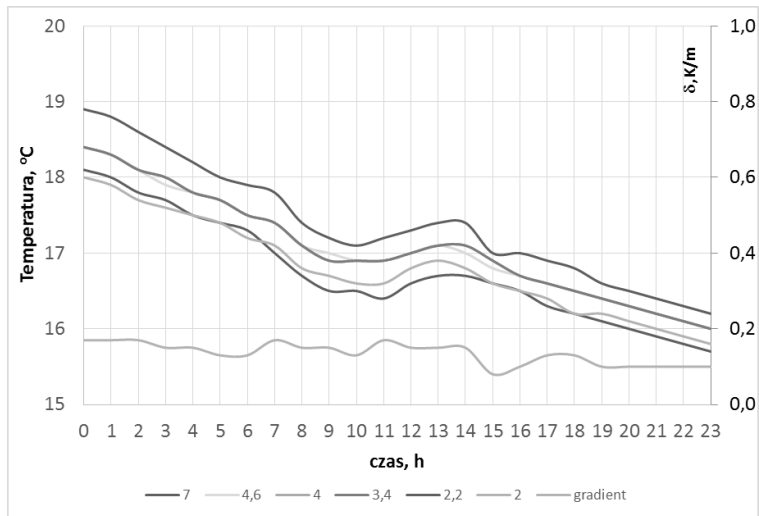


Rys. 8. Rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu w dniu 12.12.2013 r. dla 6 różnych wysokości oraz gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu w ciągu doby

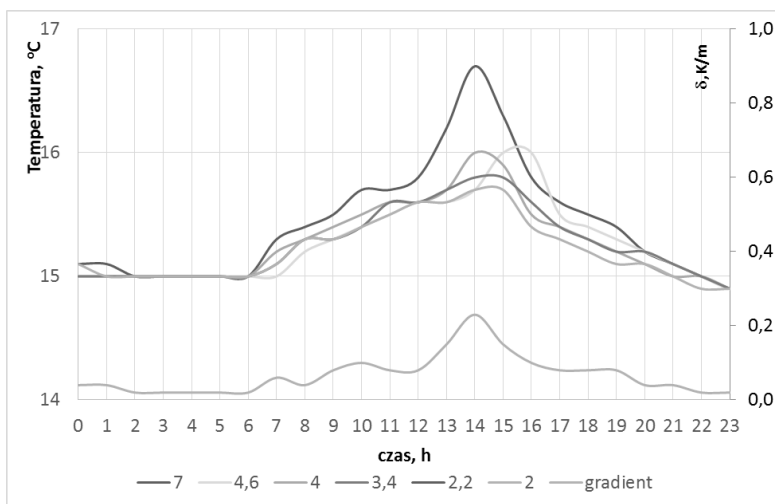
Na rysunku 9 przedstawiono rozkład temperatury powietrza w dniu, w którym gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu osiąga wartości minimalne i jest na poziomie bliskim zera. Jest to spowodowane ograniczoną do minimum produkcją. W związku z ograniczeniem zysków ciepła od technologii poniżej 25% zdecydowany wpływ na bilans ciepła zaczynają odgrywać straty ciepła pomieszczenia. Warto zwrócić uwagę na fakt, iż temperatura w strefie pracy spada z 18°C do 15,5 °C. Świadczy to o przerwie w produkcji.

Na rysunku 10 przedstawiono rozkład temperatury powietrza w dniu, w którym gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu oraz temperatura w strefie pracy skokowo zmieniają swoją wartość. Wynikało to z chwilowego uruchomienia maszyn na hali po ich serwisowaniu. Zwiększenie zysków ciepła od technologii powodowało gwałtowny wzrost temperatury powietrza w pomieszczeniu, co przeniosło się również na rozwarstwienie się temperatury powietrza ponad strefą pracy. Widać zarysowanie się tu barku wpływu akumulacji ciepła i chłodu w pomieszczeniu.





Rys. 9. Rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu w dniu 21.12.2013 r. dla 6 różnych wysokości oraz gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu w ciągu doby



Rys. 10. Rozkład temperatury powietrza w pomieszczeniu w dniu 23.12.2013 r. dla 6 różnych wysokości oraz gradient temperatury powietrza w pomieszczeniu w ciągu doby

### 3. WNIOSKI

Stratyfikacja temperatury powietrza w pomieszczeniu związana jest bezpośrednio z emisją ciepła od poszczególnych źródeł. W zależności od lokalizacji tych źródeł oraz ich udziału w sumarycznym bilansie ciepła gradacja temperatury może mieć różną charakterystykę. W niniejszej pracy uwagę skupiono na pionowym rozkładzie temperatury powietrza w hali przemysłowej, w której dominują, prawie stałe w czasie, zyski ciepła od technologii. Kiedy zyski te stanowią ok. 80÷90% ogólnego bilansu cieplnego hali, gradient temperatury powietrza w okresie przejściowym i zimowym jest w granicach 0,5 K/m. Zmienność temperatury powietrza zewnętrznego wpływać może jedynie na obniżenie lub zwiększenie poziomu wartości temperatury, ale nie wpływa na zmianę wartości gradientu. Jednak wraz ze zmniejszającym się obciążeniem cieplnym, wynikającym z technologii, zmienia się także wartość gradientu temperatury. W omawianej hali w okresie przejściowym i zimowym zauważono wahania gradientu w grudniu, kiedy zmieniano moc produkcyjną. Spowodowało to m.in. gwałtowny spadek temperatury powietrza w strefie pracy oraz stopniowy spadek temperatury w strefie podstropowej, co miało zdecydowany wpływ na wzrost chwilowego gradientu temperatury powietrza w hali. Z chwilą ograniczenia zysków ciepła od technologii do poziomu poniżej 40% w skali całkowitego bilansu zaczyna wyraźnie zarysowywać się wpływ innych źródeł ciepła na rozkład temperatury powietrza w hali. Szczególnie istotnym staje się wówczas wpływ zysków ciepła od nasłonecznienia, co szczególnie uwidacznia się w obszarze podstropowym.

### LITERATURA

- [1] FERENCOWICZ J., *Wentylacja i klimatyzacja*. Arkady, 1962.
- [2] PRZYDRÓŻNY S., *Klimatyzacja*. Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1988.
- [3] PELECH A., *Wentylacja i klimatyzacja. Podstawy*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009.
- [4] ASHRAE HANDBOOK 2001 HVAC *FUNDAMENTALS, SI EDITION*, CHAPTER 32, SPACE AIR DIFFUSION
- [5] SZCZEŚNIAK S., i.in. *Wybrane problemy podwyższania efektywności systemów inżynierskich - „Gradient temperatury powietrza w pomieszczeniach wentylowanych mechanicznie”* Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
- [6] PRZYDRÓŻNY E., SZCZEŚNIAK S., *Wyznaczanie gradientu temperatury powietrza w pomieszczeniach wysokich*. Rynek Instalacyjny, 2013, R. 21, nr 3, s. 22-25.
- [7] PRZYDRÓŻNY E., SZCZEŚNIAK S., *Wpływ gradientu temperatury powietrza na zapotrzebowanie energii do uzdatniania i transportu powietrza wentylującego*. W: Nowoczesne rozwiązania w inżynierii i ochronie środowiska. T. 2 (pod red. S. Anisimova). Politechnika Wroclawska, 2011, s. 165-170.

## TEMPERATURE DISTRIBUTION IN HIGH FACTORY HALL WITHOUT VENTILATION

Paper focuses on temperature value distribution in high factory hall where active with heat release processes. Paper includes characteristics of research and calculation results at different elevations for selected calendar days in October and December. Graphical seasonal heat load of the room in annual mode are included. Figures with daily and multidaily distribution are presented for better visualisation of temperature change in the function of the elevation.