prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
profesor zwyczajny Politechniki Koszalińskiej
ul. Hebanowa 8
75-638 Koszalin

Koszalin, 30.08.2017 r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Żanety Bogusławskiej nt.:

„Uogólniony bilans energetyczny chłodni do przechowywania żywności"

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej prof. dr hab. inż. Franciszka Tomaszewskiego – Umowa o dzieło nr 05/59/2017/248 z dnia 28.07.2017 r.

Promotorem recenzowanej pracy jest dr hab. inż. Krzysztof Bieńczak - profesor nadzwyczajny Politechniki Poznańskiej.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 118 stron i została podzielona na osiem rozdziałów. Dodatkowo podano: wykaz ważniejszych oznaczeń, wstęp, wnioski, wykaz literatury, streszczenie, oraz dwa załączniki. W treści rozprawy zawarto:

1. **Wstęp**, gdzie podano wprowadzenie w zakres tematyczny oraz przedstawiono przyjętą hipotezę rozprawy.
2. **Analiza stanu wiedzy w zakresie projektowania i badania chłodni do przechowywania żywności oraz cel i zakres pracy.** Zwrócono uwagę na ważną rolę chłodnictwa w łańcuchu żywieniowym człowieka oraz potrzebę prowadzenia dalszych prac badawczych w kierunku zwiększenia efektywności wykorzystania obiektów chłodzonych, przy jednoczesnym minimalizowaniu nakładów energetycznych z tym związanych.
3. **Bilans energii chłodni do przechowywania żywności**, gdzie podano założenia ogólne oraz szczegółowe w zakresie zasad bilansowania obiektów chłodzonych. Przedstawiono również opis przyjętego układu utrzymania klimatu obiektu chłodniczego, który będzie podstawą dalszych rozważań w niniejszej rozprawie.
4. **Algorytm programu do obliczania bilansu strumieni energii układu utrzymania klimatu w chłodni,** który Doktorantka opracowała na podstawie szczegółowej analizy przepływu energii. Algorytm ten umożliwia wykonanie bilansu energetycznego obiektów chłodzonych. Zaprezentowany program pozwala określić charakterystykę cieplną obiektu w wybranym przedziale czasowym w zmiennych warunkach eksploatacyjnych.

5. **Procedury obliczeniowe modułów algorytmu programu bilansującego strumienie energii występujące w chłodni,** które oparto na analizie przepływów strumieni energii w obiekcie chłodzonym. Przedstawiono szczegółowe zależności pozwalające wyznaczyć wartości zysków ciepła z poszczególnych źródeł mających wpływ na zapotrzebowanie mocy chłodniczej obiektu.

6. **Analiza wpływu zmian parametrów otoczenia chłodni na zapotrzebowanie energii,** z uwzględnieniem danych pogodowych z różnych okresów czasowych. Szczegółowo przedstawiono rozkłady czasowe i uporządkowane temperatury powietrza zewnętrznego i promieniowania, które są zależne od pory dnia i roku. Mają one wpływ na zapotrzebowanie energii do napędu maszyn i urządzeń obiektów chłodzonych.

7. **Urządzenia techniczne realizujące proces obróbki cieplnej powietrza wentylującego chłodnię,** gdzie opisano rozwiązania techniczne w zakresie chłodzenia obiektów, w których przechowywana jest żywność w określonych warunkach termicznych. Wskazano na możliwość stosowania bezpośredniego chłodzenia, z wykorzystaniem chłodnic wentylatorowych lub za pomocą centrali klimatyzacyjnej umieszczonej na zewnątrz obiektu chłodni.

8. **Obliczenia zapotrzebowania energii do utrzymania temperatury w chłodni przy zmiennych warunkach otoczenia**. Obliczenia prowadzono dla komór bez wypełnienia towarem i z wypełnieniem w oparciu o dane pogodowe rzeczywistych przedziałów czasowych. Porównano wyniki obliczeń według własnego algorytmu z wynikami badań eksperymentalnych uzyskując zadowalającą zgodność.

9. **Ocena wpływu układów nawiewu powietrza do komory chłodniczej na możliwość utrzymania równomiernego rozkładu temperatury powietrza**, dokonaną na podstawie obliczeń z wykorzystaniem programu numerycznego do symulacji przepływów. Wykazano zdecydowany wpływ położenia generatorów ruchu powietrza w komorze chłodniczej i sposobu ustawienia towaru na organizację ruchu powietrza, w tym przedewszystkim równomierność jego przepływu i wyrównanie temperatury.

10. **Wnioski** z przeprowadzonej analizy podsumowujące uzyskane rezultaty zrealizowanej rozprawy.

11. **Bibliografia**, która zawiera 49 pozycji literaturowych krajowych i zagranicznych.

12. **Załączniki**, które zawierają przykładowe wartości właściwości fizycznych materiałów, wyrobów i komponentów stosowanych przy budowie chłodni, wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla muru z pustaków ceramicznych w warunkach średnio wilgotnych oraz warunki powietrza zewnętrznego w Poznaniu w styczniu 1997 roku.

13. **Streszczenie** rozprawy w języku angielskim.

2. Hipoteza pracy

Doktorantka podała we wstępie hipotezę swojej pracy twierdząc, że: *„Możliwe jest opracowanie względnie prostego programu symulacyjnego, na bazie uogólnionego równania bilansu energii chłodni, który umożliwi z wystarczającą dokładnością symulacje zapotrzebowania na energię do chłodzenia przechowywanych produktów spożywczych, przy zmiennych parametrach zewnętrznych"*.

Mając na uwadze konieczność udowodnienia powyższej tezy Doktorantka wykonała analizę zależności opisujących przepływy energii w bilansowanym obiekcie chłodniczym, opra-

cowała algorytm programu do obliczania bilansu strumieni energii układu utrzymania właściwego klimatu w chłodni, zaproponowała procedury obliczeniowe modułów algorytmu. W oparciu o własne narzędzie w postaci modelu numerycznego przeprowadziła obliczenia zapotrzebowania na energię w chłodni pracującej przy zmiennych warunkach otoczenia oraz w różnych wariantach eksploatacji obiektu chłodzonego. Uzyskane wyniki obliczeń, według opracowanego programu symulacyjnego porównano z wynikami badań eksperymentalnych w warunkach eksploatacyjnych uzyskują zadowalającą zgodność. Przedstawioną analizę wyznaczonych charakterystyk eksploatacyjnych chłodni uzupełniono opisem zastosowanych urządzeń chłodniczych i oceną wpływu organizacji przepływu powietrza w komorze chłodniczej na równomierność rozkładu jego temperatury. W ramach wymienionego zakresu działań Doktorantka uzasadniła hipotezę swojej pracy.

3. Rozwinięcie hipotezy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy poszukiwania nowych narzędzi obliczeniowych w zakresie bilansowania obiektów o kontrolowanych parametrach powietrza wewnętrznego, a szczególnie chłodzonych w celu podniesienia poziomu jakości ich projektowania, jak i oceny wykorzystania w warunkach eksploatacyjnych. Głównym celem projektowania obiektów chłodzonych jest właściwy dobór maszyn i urządzeń chłodniczych zapewniających oszczędność energii napędowej, ale jednocześnie właściwą pracę w zakresie utrzymania założonych parametrów powietrza wewnętrznego w ciągu całego roku bez względu na zmianę warunków otoczenia. Jest to bardzo istotne i nie łatwe do pogodzenia. Zmienne warunki eksploatacyjne sugerują podwyższenie rezerwowej mocy chłodniczej instalacji, aby sprostać ekstremalnym warunkom pracy obiektu. Powoduje to jednak wzrost nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych (podwyższone zapotrzebowania na energię napędową). Dlatego istnieje potrzeba wykorzystywania, w miarę precyzyjnych procedur obliczeniowych, pozwalających z możliwie dużą dokładnością bilansować obiekty chłodzone w celu określenia zapotrzebowania na moc chłodniczą, a docelowo moc elektryczną układów napędowych. Działania takie są wymuszone nie tylko potrzebą racjonalnego gospodarowania energią, rachunkiem ekonomicznym, ale i ochroną środowiska naturalnego człowieka. Wzrost zastosowania tego typu rozwiązań przyczynia się do ograniczenia zużycia energii pierwotnej i zmniejszenia efektu cieplarnianego. Dlatego należy uznać, że temat podjęty przez Doktorantkę jest aktualny i interesujący, a rozwiązywane problemy są istotne pod względem aplikacyjnym. Doktorantka przeprowadziła, po krótkim wprowadzeniu, analizę dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie podjętego tematu. Wykazała, że pomimo wielu prac dotyczących bilansowania obiektów chłodzonych, podających szereg zależności i procedur obliczeniowych istnieje potrzeba opracowania względnie prostego programu symulacyjnego, który umożliwi z wystarczającą dokładnością symulacje zapotrzebowania na energię do chłodzenia przechowywanych produktów spożywczych, przy zmiennych parametrach zewnętrznych. Mając powyższe na uwadze Doktorantka podała w rozdziale pierwszym swojej rozprawy, obok celu pracy również jej zakres.

Rozdział drugi rozprawy podaje zasady bilansowania obiektów chłodzonych. Na podstawie źródeł literaturowych zaproponowano zależności, które stanowiły podstawę opracowania algorytmu obliczeniowego, który opisano w rozdziale trzecim. Algorytm wykonany w programie MS Excel zawiera wszystkie moduły systemu utrzymania klimatu, powiązane zależnościami bilansowymi. Program wykonuje dla określonych warunków brzegowych obliczenia w pętli iteracyjnej do momentu osiągnięcia założonego wskaźnika zbieżności. W oparciu o przeprowadzone obliczenia można określić moc chłodniczą niezbędną do utrzymania zadanej temperatury w komorze chłodniczej oraz zapotrzebowanie mocy napędowej instala-

cji. Powtarzając obliczenia przy zmiennych wartościach temperatury zewnętrznej, nasłonecznienia, wielkości wsadu i innych zewnętrznych źródeł ciepła, można określić charakterystykę chłodniczą układu w wybranym przedziale czasu.

W rozdziale czwartym podano procedury obliczeniowe poszczególnych modułów algorytmu programu bilansującego strumienie energii występujące w chłodni. Analizę zmian parametrów otoczenia chłodni (temperatury zewnętrznej i promieniowania) w okresach rocznych i dobowych zawarto w rozdziale piątym. Przedstawiono rzeczywiste i uporządkowane wykresy zmiany temperatury powietrza zewnętrznego stwierdzając znaczne różnice tych wartości w analogicznych okresach poszczególnych lat i dni. Rozdział szósty zawiera opis rozwiązań technicznych w zakresie chłodzenia obiektów, w których przechowywana jest żywność w określonych warunkach termicznych. Wskazano na możliwość stosowania bezpośredniego chłodzenia z wykorzystaniem chłodnic wentylatorowych lub za pomocą centrali klimatyzacyjnej umieszczonej na zewnątrz obiektu chłodni.

W rozdziale siódmym i ósmym przedstawiono wyniki obliczeń (opartych o własny algorytm symulacyjny) i analizę zapotrzebowania energii do utrzymania stałego poziomu temperatury w chłodni, przy zmiennych warunkach otoczenia dla pustej i załadowanej komory chłodniczej. Przedstawiono zależności obliczeniowe w postaci dobowego zapotrzebowania na energię elektryczną przykładowej chłodni w zestawieniu ze zmianami temperatury zewnętrznego powietrza atmosferycznego. Wykazano, że fluktuacje zmiany zapotrzebowania na energię napędową (chociaż stłumione) korespondują z fluktuacjami zmiany temperatury. Wyniki obliczeń według zaproponowanego algorytmu porównano z wynikami badań eksperymentalnych przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym, którym była chłodnia do przechowywania kapusty. Uzyskano zgodność w zakresie do 10% (w w niektórych przypadkach do 15%), co należy uznać za zadowalające.

Doktorantka przeprowadziła też modelowanie numeryczne przepływu powietrza w komorze chłodniczej pustej i załadowanej towarem (rozdział 8). Badała także wpływ organizacji przepływu powietrza, wywołanej różnym położeniem generatora ruchu i umieszczenia towaru na równomierność przepływu powietrza. Jest to bardzo ważne, ponieważ równomierny rozkład prędkości powietrza w obrębie obiektu chłodzonego wpływa na wyrównanie temperatury powietrza w całej przestrzeni. Wykazano, że właściwe ustawienie wentylatorów i towarów w komorze ma istotny wpływ na warunki przechowywania towarów i ich jakość.

4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy

Zaprezentowany przez Doktorantkę cel i zakres rozprawy doktorskiej wynika z potrzeby prowadzenia prac mających na celu doskonalenie procesu projektowania obiektów chłodzonych do przechowywania żywności. Takie działania mają poprawić efektywność ich działania i ograniczyć zużycie energii pierwotnej wykorzystywanej do napędu maszyn i urządzeń energetycznych. Tylko dobrze dobrane urządzenia instalacji chłodniczej lub klimatyzacyjnej gwarantują poprawną jej pracę, zarówno pod względem wysokiej sprawności, niskiego zużycia energii i małej awaryjności. Jednym z narzędzi wykorzystywanych w procesie projektowania jest program obliczeniowy, który z dostateczną dokładnością pozwala wyznaczyć zapotrzebowanie na moc chłodniczą i zużycie energii napędowej w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Chociaż w praktyce inżynierskiej istnieje wiele programów obliczeniowych, wykorzystywanych w bilansowaniu obiektów chłodzonych, to nie zawsze uwzględniają one wszystkie wielkości występujące w rzeczywistym bilansie energetycznym chłodzonego obiektu. Dlatego należy uznać za cenne, że Doktorantka podjęła się opracować własny program symulacyjny uwzględniający praktycznie wszystkie strumienie ciepła występujące podczas eksploatacji obiektu chłodzonego do przechowywania żywności.

Ważnym osiągnięciem Doktorantki jest nie tylko opracowanie własnego algorytmu obliczeń ale również uzyskane wyniki analizy zapotrzebowania energii do utrzymania temperatury w chłodni przy zmiennych warunkach otoczenia dla pustej i załadowanej komory chłodniczej. Opracowany program komputerowy dla wprowadzonych danych wejściowych do obliczeń pozwala uzyskać istotne wielkości charakteryzujące obiekty chłodzone. Ponadto zmiana danych wejściowych pozwala uzyskać zmianę danych obliczeniowych w sposób „płynny". Interesującym jest przedstawienie wyników obliczeń w postaci uporządkowanej. Pozwalają one na ocenę pracy instalacji chłodniczej w poszczególnych miesiącach i określić stopień jej wykorzystania. Ponadto wykresy uporządkowane mogą być wykorzystane do doboru agregatów chłodniczych. Należy również podkreślić nowatorski sposób interpretacji wyników obliczeń w postaci kołowych uporządkowanych wykresów zużycia energii w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego. Wykresy takie zbudowane w oparciu o metodę Szumana pozwalają ocenić na przestrzeni okresu eksploatacyjnego zmianę zapotrzebowania na moc chłodniczą i energię napędową instalacji chłodniczej w zależności od temperatury zewnętrznej i innych oddziaływań eksploatacyjnych.

Reasumując należy stwierdzić, że Doktorantka opracowała oryginalne i wartościowe narzędzie do bilansowania obiektów chłodzonych, które zweryfikowała w warunkach eksploatacyjnych rzeczywistego obiektu. Wyniki przeprowadzonych analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

5. Wartości użytkowe pracy

Prezentowana rozprawa doktorska ma znaczenie aplikacyjne. Dotyczy ona istotnego problemu poszukiwania nowych narzędzi obliczeniowych w zakresie usprawnienia projektowania obiektów chłodzonych do przechowywania żywności. Opracowany algorytm obliczeń i program komputerowy pozwalają na podstawie przyjętych warunków brzegowych, prowadzić obliczenia bilansowe obiektu chłodzonego i mają na celu wyznaczenie zapotrzebowania mocy chłodniczej i energii napędowej układu. Obliczenia mogą być prowadzone dla zmiennych warunków otoczenia chłodni, jak i zmian w jej eksploatacji. Pozwala to na optymalny dobór maszyn i urządzeń chłodniczych do danego obiektu. Pozwoli to zmniejszyć nakłady inwestycyjne i eksploatacyjne nowo budowanych obiektów.

Innym sposobem wykorzystania opracowanego programu obliczeniowego może być jego sprzężenie z programem prognozującym pogodę, a w szczególności temperaturę powietrza zewnętrznego. Takie wyprzedzające działania mogą prowadzić do wcześniejszego dopasowania wielkość mocy chłodniczej do późniejszego zapotrzebowania na nią. Pozwoli to na znaczne oszczędności w zużyciu energii napędowej obiektu.

Istotną wartością tej pracy jest fakt, że Doktorantka podjęła w niej próbę przedstawienia zmiany zapotrzebowania energetycznego obiektu chłodzonego od parametrów otoczenia w wersji wykresów uporządkowanych. W większości przypadków ten sposób analizy zapotrzebowania mocy urządzeń do obsługi obiektów stosowany był w zakresie typowych obiektów energetycznych w energetyce cieplnej (np. przy projektowaniu wielkości ciepłowni). Wprowadzenie tej metodyki do obliczeń bilansowych obiektów chłodzonych stanowi istotne novum wniesione do techniki chłodniczej. Można wyrazić nadzieję, że metodyka ta, oparta na wykresach energetycznych uporządkowanych oraz na ich splotach będzie w dalszym ciągu rozwijana.

Prezentowana rozprawa jest istotnym wkładem Autorki do poszukiwania nowych rozwiązań i ich praktycznych zastosowań w obiektach chłodzonych. Jest to szeroko pojęte dzia-

łanie zmierzającego do racjonalnego gospodarowania zasobami energetycznymi w celu zmniejszenia zużycia energii pierwotnej.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. W pracy przedstawiono program komputerowy pozwalający obliczyć zapotrzebowanie mocy chłodniczej dla obiektów chłodzonych oraz wartość mocy napędowej urządzenia chłodniczego, co związane jest bezpośrednią z koniecznością określenia współczynnika wydajności COP. W pracy nie podano, w jaki sposób wyznaczano wartość tego współczynnika. Na stronie 46 rozprawy jest tylko krótka informacja, że wynosił on od 2 do 4. Wskazanym byłoby podanie metodyki określania tej wartości.
2. Doktorantka przyjęła sposób pośredni chłodzenia powietrza doprowadzanego do komory chłodniczej za pomocą centrali klimatyzacyjnej, która pozwala nie tylko sterować temperaturą powietrza, ale i jego wilgotnością. Na stronie 11 podano: *„W pracy przedstawiony zostanie podstawowy bilans energii i masy, opisujący system chłodzenia dowolnego obiektu ….”*. Jednak w pracy nie ma bilansu masy. Praca zyskała by bardziej na wartości gdyby oprócz zapotrzebowania na moc chłodniczą opracowany program określałby również zapotrzebowanie na zyski wilgoci. W przypadku komór chłodni, tzw. dodatnich jest to bardzo istotne.
3. W tytule rozdziału 5 podano, że zawiera on analizę wpływu zmian parametrów otoczenia chłodni na zapotrzebowanie energii. Tymczasem w treści rozdziału zawarto tylko rozkłady czasowe i uporządkowane temperatury powietrza zewnętrznego i promieniowania w zależne od pory dnia i roku.
4. W rozdziale 7 przedstawiono w oparciu o metodę Szumana interpretację wyników obliczeń w postaci kołowych uporządkowanych wykresów zużycia energii w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego, przykładowo dla kilku kolejnych miesięcy. Szkoda, że przedstawiona w tym zakresie analiza jest bardzo uproszczona i nie pokazuje wszystkich korzyści tej metody. Należy rozważyć możliwość wprowadzenia uniwersalnego wykresu temperatury zewnętrznej wg Reissa (z odnośnymi poprawkami dla urządzeń chłodniczych), co pozwoliłoby sporządzić wykres uporządkowany obciążeń chłodniczych dla pełnego rocznego cyklu pracy (a nie dla jednego miesiąca).
5. W rozdziale 8 podano wyniki numerycznej symulacji przepływu powietrza w komorze chłodniczej. W opisie rysunków nie podano, czy zawierają one tory ruchu cząstek powietrza czy stałe poziomy prędkości powietrza?

Uwagi edytorskie

- ogólne

1. Należy podkreślić wysoki poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Praca została napisana w sposób zrozumiały. Zwraca uwagę wysoka jakość opracowania całego maszynopisu.
2. Praca zyskałaby jeszcze bardziej na jakości edytorskiej, gdyby Autorka wprowadziła opcję dzielenia wyrazów, co usunęłoby niekiedy zbyt długie odstępy pomiędzy wyrazami.

Ponadto należy zwracać uwagę, aby na końcu wiersza nie pozostawała wolna litera. Ładniej jest edytorsko, kiedy znajduje się ona na początku wiersza przed wyrazem, któremu towarzyszy.

3. W pracy zdarzają się liczne powtórzenia tekstu, które można było pominąć.
4. Doktorantka używa potocznego słowa „chłód". Z fizycznego punktu widzenia taka wielkość nie istnieje. Jeżeli to pojęcie używamy, to trzeba go podawać w cudzysłowie.

- szczegółowe

1. W pracy w kilku miejsca nie powołano się na źródła literaturowe, na podstawie których podaje się dane zalecane do obliczeń, np. Tablica 4.4, Tablica 4.5, Tablica 4.7 i wzór 4.12 itp.
2. Na stronie 65 używa się pojęć: *„przebieg mocy obliczeniowej"*, *„fluktuacje przebiegu energii"*. Słowo „przebieg" należy zamienić na „zmiana *w czasie*".
3. Na stronie 71 jest zapis *„...obliczenia były wyższe średnio o 15%."*. Powinno być „...wyniki *obliczeń były wyższe średnio o 15%.*".

7. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest zwięźle, rzeczowo i w sposób zrozumiały. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktorantki do dalszych analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych dotyczących nowych rozwiązań w zakresie projektowania i eksploatacji obiektów chłodniczych. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy, którą oceniam pozytywnie.

8. Wniosek do Rady Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorantka wykazała się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazała także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu budowy i eksploatacji maszyn w prowadzeniu analiz teoretycznych, obliczeń komputerowych, badań eksperymentalnych i opracowaniu uzyskanych wyników. Obok odpowiedniego poziomu naukowego rozprawy, należy podkreślić duży stopień jej aplikacyjności. Wnioskuję o przyjęcie pracy mgr inż. Żanety Bogusławskiej, jako rozprawy doktorskiej spełniającej wymagania Ustawy o stopniach i tytule naukowym i o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autorki i jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie maszyn i urządzeń energetycznych oraz szeroko pojętego działania zmierzającego do podnoszenia efektywności i sprawności procesów w gospodarce energetycznej.