

JAN KUBIK

PODSTAWY FIZYKI BUDOWLI

OPOLE 2008

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE DO FIZYKI BUDOWLI	5
I. PRZEPIĘTY W BUDOWLACH	9
1 ZARYS PROBLEMATYKI.....	9
2 PODSTAWOWE RODZAJE PRZEPIĘWÓW MASY I ENERGII W PRZEGRODACH	10
3 DYFUZJA GAZÓW W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH.....	13
4 ZASADA ZACHOWANIA ENERGII	16
5 BILANS ENTROPII	17
6 OŚRODKI IDEALNIE	18
7 RÓWNANIE PRZEWODNICTWA CIEPŁA	20
II. PRZEPIĘWY CIEPŁA	25
8 PRZEPIĘWY CIEPŁA PRZEZ WARSTWY	25
9 PRZEPIĘWY CIEPŁA PRZEZ ŚCIANKI WALCOWE.....	27
10 WYZNACZANIE STRAT CIEPŁA W BUDYNKU I EMISJI CO ₂	30
III. PRZEPIĘWY WILGOCI.....	39
11 WILGOĆ W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH	39
12 RUCH WILGOCI W MATERIALE BUDOWLANYM	39
13 PODCIĄGANIE KAPILARNE.....	41
14 ODDZIAŁYWANIE CZĄSTKI WILGOCI ZE ŚCIANĄ KAPILARY	42
15 RUCH WILGOCI – RÓWNANIA KONSTITUTYWNE.....	45
16 RÓWNANIE RUCHU CIECZY W MATERIALE KAPILARNO POROWATYM.....	49
17 RÓWNANIE FILTRACJI	52
18 WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKÓW PRZEPIĘWU WILGOCI.	53
IV. ZŁOŻONE PRZEPIĘWY W PRZEGRODACH.....	57
19 JEDNOCZESNY PRZEPIĘW CIEPŁA I WILGOCI W MATERIALE	57
20 PRZEPIĘWY CIEPŁA I WILGOCI Z UWZGLĘDNIENIEM KONDENSACJI PARY WODNEJ W PRZEGRODACH	58
21 WPŁYW FILTRACJI POWIETRZA NA PRZEPIĘWY CIEPŁA W PRZEGRODZIE	60
22 PRZEPIĘWY CIEPŁA I POWIETRZA Z DOMINACJĄ GRADIENTU TEMPERATURY...62	62
23 PRZEPIĘWY CIEPŁA I POWIETRZA Z DOMINACJĄ PRZYROSTÓW CIŚNIENIA	63
24 RÓWNOCZESNY PRZEPIĘW CIEPŁA I WILGOCI W PRZEGRODZIE.....	63
25 PRZEMIAN FAZOWA WODA-LÓD W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH	66
26 PRZEPIĘWY CIEPŁA PRZY PRZEMIANIE WODY W LÓD	70
27 WYKWITY SOLI NA POWIERZCHNI MURÓW.....	74

V.	ŚWIATŁO W BUDYNKU	81
28	SFORMUŁOWANIE PROBLEMU	81
29	PODSTAWOWE MODELE OŚWIETLENIA	83
30	ZŁOŻONE OPISY OŚWIETLENIA	85
31	OŚWIETLENIE POWIERZCHNI ODBIJAJĄCYCH ŚWIATŁO.....	87
32	POWIERZCHNIE ADSORBUJĄCE PROMIENIOWANIE.....	89
33	SPADEK NAPIĘCIA POWIERZCHNIOWEGO WYWOŁANY PRZEZ RADIACJE	90
VI.	OCHRONA PRZECIWOŻAROWA BUDYNKÓW.....	95
34	ETAPY ROZWOJU POŻARU	95
35	NAPRĘŻENIA POŻAROWE W KONSTRUKCJI STAŁOWEJ	96
VII.	AKUSTYKA BUDOWLI	101
36	WPROWADZENIE.....	101
37	RÓWNANIE FALOWE.....	101
38	RODZAJE FAL	103
39	ODBICIE I ZAŁAMANIE FAL AKUSTYCZNYCH	104
40	POLE AKUSTYCZNE W OTOCZENIA ŹRÓDŁA DŹWIĘKU.....	105
41	AKTYWNE TŁUMIENIE DŹWIĘKÓW	107
VIII.	BUDYNKI PASYWNE.....	109
42	GENEZA IDEI BUDYNKÓW PASYWNYCH	109
43	GUDOWA KOLEKTORA CIECZOWEGO	112
44	TEORIA PRZEJMOWANIA CIEPŁA PRZEZ KOLEKTORY	113
45	WYMIENNIK CIEPŁA.....	117
	<i>ZAŁĄCZNIK 1</i>	121
	<i>ZAŁĄCZNIK 2</i>	141
	LITERATURA.....	147
	STRESZCZENIE.....	149
	SUMMARY	150
	SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	151

WPROWADZENIE DO FIZYKI BUDOWLI

Jest rzeczą oczywistą, że osoby biorące zawodowo udział w tworzeniu i eksploatacji budynku preferują różne aspekty swoich profesji. **Architekt** analizuje *funkcję i formę*. Widzi sens w grze proporcji, ekspresji i wyrazistości formy – a więc w geometrii podporządkowanej jego wizji. **Konstruktor** odpowiada za *proste i pewne przeniesienie obciążeń na fundamenty* i podłoże. Interesuje go trwałość i niezmiennosc elementów konstrukcyjnych oraz ich powiązań. **Socjolog** w budynku może upatrywać miejsca tworzenia się kultury lub procesów społecznych. **Ekologa** interesować będzie oddziaływanie budynku na otoczenie i ewentualne *zmiany w ekosystemie* wywołane zespołem budowli. Natomiast **fizyk budowli** widzi w nim *wnętrze odgródzone od otoczenia powłoką, przez którą dochodzi do przepływów masy, pędu, energii oraz przemian fazowych*. Przepływy masy to najczęściej wilgoć i rozpuszczone w niej składniki. Swoje zadanie widzi w zapewnieniu komfortu cieplnego i odpowiedniego klimatu we wnętrzu budowli dla jego użytkowników w powiązaniu z zapewnieniem minimalnych strat energii.

Widać więc, iż specyfika zawodowa powoduje różne preferencje w postrzeganiu tej samej rzeczywistości, w której powstaje budowla, przy czym architekt syntezyzuje rozwiązania szczególne i posiada decydujący głos w projektowaniu. Podobną rolę powinien odegrać fizyk budowli w zagadnieniach eksploatacji.

Przedmiot fizyki budowli

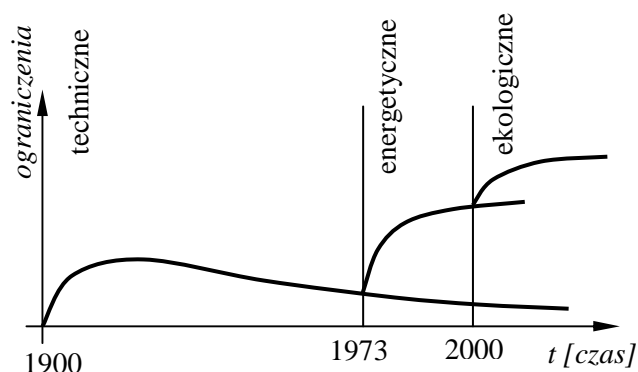
Jeżeli przyjąć najprostszą pragmatyczną definicję fizyki budowli, jako tę część *aplikacyjnej fizyki, którą można wykorzystać do lepszego funkcjonowania budownictwa* to zauważamy, iż poza nią znajduje się wiele zagadnień należących do technologii budowlanej, a w tym procesów wytwarzania materiałów budowlanych po wymiarowanie konstrukcji. Zauważmy, iż bieżące potrzeby budownictwa w pierwszej kolejności wykreaowały mechanikę budowli i technologie budowlane, a dopiero potrzeby związane z komfortem cieplnym powołały do życia fizykę budowli. Fizyka budowli zawiera jednak również opisy złożonych oddziaływań. Pierwsze z nich to łączne opisy wzajemnych powiązań przepływów ciepła z ruchem wilgoci w ścianach budowli. W tym kręgu zagadnień znalazły się m.in. procesy przemian fazowych woda – lód jak i kondensacja kapilarna. Inna grupa zagadnień to działanie wysokich temperatur na budowle – typowe w czasie pożaru.

Natomiast w najprostszym rozumieniu fizykę budowli traktuje się jako dyscyplinę gdzie bada się energetyczne oddziaływania zachodzące między budynkiem a otoczeniem. Zapewniać należy przy tym określone warunki zamieszkania, czyli komfort cieplny, przy możliwie minimalnym zużyciu

energii, a obecnie coraz częściej wymaga się minimalnego oddziaływania ze środowiskiem. Innym aspektem jest tu trwałość budowli oraz związane z nim rozeznanie mechanizmów narastania uszkodzeń w wyniku oddziaływania budowli z otoczeniem. Ten praktyczny aspekt fizyki budowli powoduje, iż nie jest to tylko dyscyplina wiedzy, ale mamy tu do czynienia z fragmentem działalności zapewniającym normalną eksploatację budowli.

Ograniczenia cywilizacyjne budownictwa

Fizyka budowli nierozdzielnie łączy się z tendencjami rozwojowymi budownictwa dając odpowiedź na stawiane przez cywilizację problemy.



Ograniczenia budownictwa

Szczególnie na początku lat 70, pierwszy kryzys naftowy uświadomił energetyczne ograniczenia cywilizacji technicznej a w tym **energetyczne bariery budownictwa**. Powstała wówczas idea budynku o zminimalizowanym zużyciu energii, a standardem stały się ocieplenia ścian istniejących i projektowanych budowli. Rozwinęły się różne warianty ścian warstwowych, ale duże gradienty temperatur nie są obojętne dla wilgoci w ścianie – powodują ruch wilgoci oraz jej kondensację właśnie na stykach warstw. Fakt ten uświadomił projektantom, że oprócz analizy przepływów ciepła należy też równolegle rozpatrywać ruch wilgoci w przegrodach.

W ostatnim okresie wobec wymogów ochrony środowiska stanęły problemy minimalizacji niekorzystnego oddziaływania budowli na środowisko. Jednym z przejawów tego oddziaływania jest ograniczenie produkcji dwutlenku węgla CO_2 – powodującego w zasadniczym stopniu globalny efekt cieplarniany. Stanęliśmy tu więc przed **barierą ekologiczną**.

Energetyczne uwarunkowania budownictwa

Z punktu widzenia budownictwa problemy aktywnego czy też pasywnego pozyskiwania energii są równie ważne jak uwarunkowania ekologiczne. Problem jest szczególnie pilny wobec ograniczonych źródeł energii. Zasadniczą

możliwość widzi się tu w konwersji energii słonecznej na ciepłą. W tym widzeniu rzeczy słoneczne kolektory cieczowe stają się typowym elementem dachów. Podobną rolę przewiduje się dla nasłonecznionych ścian.

Natomiast najbardziej skuteczne okazały się ocieplenia budynków po uświadomieniu społeczeństwa o ograniczoności źródeł energii. Właśnie w kręgu idei prymatu minimalizacji strat energii w budownictwie powstały pojęcia budynków o *minimalnym zużyciu energii*, *budynków pasywnych* oraz certyfikaty energetyczne budynków.

Modele przepływów w ścianach

W następstwie ociepleń budynków powstawały warstwowe układy ścian z zewnętrzną warstwą izolacji cieplnej. W przegrodach stykały się masywne elementy konstrukcyjne z lekkimi i porowatymi materiałami izolacji termicznej. Niestety ta duża różnica cech cieplno-wilgotnościowych powodowała, iż na stykach warstw dochodziło do zaburzeń przepływów, których efektem była kondensacja wilgoci, a w zimie tworzenie się kryształów lodu i rozsadzanie ścian. Na omówione problemy fizyka budowli dała odpowiedź. Wiązało się to z przejściem od klasycznej analizy przepływów ciepła (lata 70-te) do rozwiązywania sprzężonych przez źródła równań termodyfuzji (lata 80-te). Kolejny etap związany był z opisami przemian fazowych woda-lód, gdzie oprócz przepływów ciepła, wilgoci i przemian fazowych uwzględniano jeszcze dystorsyjne stany naprężeń powstające w efekcie tych przemian. Wymagało to jednak dalszego rozwoju modeli przepływów w przegrodach, do których adaptowano teorie ośrodka wieloskładnikowego (lata 90). Uwzględniano w nich zjawiska powierzchniowe występujące na wewnętrznych powierzchniach typowych materiałów budowlanych. Występujące tu specyficzne właściwości kapilarno-porowatych materiałów budowlanych, takie jak skurcz, pęczanie i relaksacja w połączeniu z przyczynami natury niemechanicznej prowadziły do złożonych zagadnień termomechaniki. Kolejny krok w fizyce budowli wynikał również z potrzeb praktyki – były to problemy trwałości, które łączyły modele mechaniczne z szeroko rozumianymi zagadnieniami fizyki i chemii.

Aktualne problemy fizyki budowli

W bliskiej perspektywie, przetwarzanie energii słonecznej do celów użytkowych stanie się w budownictwie mieszkalnym powszechne, a w szczególności:

- Popularne staną się *próżniowe kolektory cieczowe* jako instalacje pozwalające na pozyskiwanie znacznych ilości energii słonecznej wraz z przetworzeniem jej na ogrzewanie. Duże znaczenie posiadają tu nowoczesne materiały pokryć maksymalizujące absorpcję promieniowania świetlnego.

- Następną grupą rozwiązań pozyskiwania energii to *zmiennofazowe materiały kompozytowe* o ograniczonej przemianie fazowej w przedziale 16÷21 °C.

– Pompy ciepłe pozwalające wykorzystać *niskotemperaturowe zasoby ciepła*.

– *Architektura solarna* wykorzystująca fasady i dachy do pozyskiwania energii, tzw. ogrody zimowe itp.

– W nieco dalszej perspektywie również przetwarzanie *energii słonecznej na elektryczną* stanie się powszechne. Wprowadza to jednak, nieznane dotychczas w inżynierii budowlanej, zagadnienia elektryczne a dokładniej fotoelektryczne. Symptomy tego przełomu są już dzisiaj widoczne. W pierwszej kolejności musi jednak dojść do przełomu materiałowego, gdzie kruche silikaty powinny zostać zastąpione przez tworzywa sztuczne zapewniające konwersję promieniowania świetlnego na elektryczność. Materiały takie są już znane, pozostaje jedynie do opracowania ich opłacalna produkcja na dużą skalę. Należy się więc liczyć z zamianą tradycyjnych pokryć na warstwy absorbujące i przetwarzające energię świetlną na elektryczną. Warto zauważyć, iż od 10 lat są już testowane prototypowe rozwiązania w tym zakresie (Uniwersytet Freiburg).

– Układy sterowania procesami pozyskiwania energii jako fragmenty „*inteligentnego budynku*”.

Kolejne problemy związane są z akustyką budowlaną, gdzie nowe lekkie przegrody stają się raczej przewodnikami dźwięku niż izolacją akustyczną. Pojawiają się tutaj układy z aktywnym tłumieniem dźwięków.

Ekspansja fizyki budowli ma również miejsce w dziedzinie konserwacji zabytków. Pojawiają się tam nowe oryginalne problemy jak odsalanie zabytkowych ścian, zjawiska powierzchniowe przy konserwacji malowideł ściennych, efekty radiacji i inne.

Problemy kształcenia

Wydaje się, że rozwijająca się w ostatnim okresie w wyniku wyzwań energetycznych i ekologicznych fizyka budowli powinna prowadzić do zmian w programach studiów.

W pierwszej kolejności w wykładach na wydziałach budownictwa muszą się znajdować elementy energetyki – kształtujące odmienną wyobraźnię inżyniera. Zauważmy, iż zrozumienie przemian i przepływów energii w konstrukcjach i ścianach budowli jest warunkiem nowoczesnego kształcenia inżynierów budownictwa. Należy się też liczyć z tym, że poza konstrukcjami budowlanymi, materiałami, geotechniką w najbliższym czasie pojawi się również fizyka budowli jako nowa specjalność na wydziałach budownictwa.

Z podanych przesłanek wynikała próba zbudowania uniwersalnego programu kształcenia w zakresie fizyki budowli na uczelniach uniwersyteckich. Program ten, podany w załączniku 2 w postaci *Memorandum: „Building physics 2000”*, zawiera zalecany zakres wykładów i podstawę kształcenia w zakresie fizyki budowli w krajach EU.