



dr inż. Artur Piekarczyk*



dr inż. Ewa Szewczak*

Badania metodami obliczeniowymi w świetle Rozporządzenia 305/2011 (CPR)

Wdrożenie *Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) Nr 305/2011 z 9 marca 2011 r. ustanawiającego zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG* tzw. CPR (Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 88/5) przysparza producentom, jednostkom notyfikowanym, a także organom notyfikującym wielu problemów, wynikających z dodatkowych czynności, które są niezbędne w celu spełnienia nowych wymagań formalnych oraz ewidentnych wad i niejasności, jakimi jest ono obciążone. Ponadto rozważane są już kolejne zmiany w CPR. Jedną z nich jest wprowadzenie dodatkowej grupy jednostek notyfikowanych „calculation bodies”, czyli „jednostek obliczeniowych”, które na wzór laboratoriów notyfikowanych wykonujących badania typu, wykonywałyby „obliczenia typu”.

Obecnie zgodnie z zapisami załącznika nr V do CPR, odpowiedzialność za *ustalenie typu wyrobu na podstawie badań typu, obliczeń typu, tabelarycznych wartości lub opisowej dokumentacji wyrobu* zależy od systemu oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych. W systemach 1, 1+ i 3 odpowiedzialność przypisana jest jednostce notyfikowanej, a w systemach 2+ i 4 producentowi. Odpowiedzialność producenta za badania w systemie 2+ i 4 nie oznacza oczywiście, że musi on sam wykonać badania.

Badania metodami obliczeniowymi stanowią alternatywną podstawę ustalenia typu wyrobu w stosunku do badań eksperymentalnych, dlatego jednostki je wykonujące podlegają i podlegać powinny takim samym kryteriom oceny jak jednostki notyfikowane.

Badania metodami obliczeniowymi są stosowane obok badań metodami eksperymentalnymi w kilku obszarach związanych z oceną wyrobów budowlanych, w tym w akusty-

ce, fizyce cieplnej i w badaniach mechanicznych. Powodem stosowania obliczeń zamiast eksperymentu jest przede wszystkim dążenie do obniżenia kosztów, ale też możliwości współczesnych metod obliczeniowych, ponieważ większość z nich doskonale odwzorowuje eksperyment. Obliczenia stosuje się tam, gdzie np. eksperyment może być kłopotliwy ze względu na rozmiary badanych obiektów.

Podczas rozważań dotyczących jednostek wykonujących badania metodami obliczeniowymi należy rozróżnić badawcze metody obliczeniowe od prostych przeliczeń wyników badań oraz od obliczeń projektowych. Proste obliczenia i przeliczenia wyników badań to operacje matematyczne na liczbach, których wynik musi być ten sam i nie zależy od specyfiki zjawiska fizycznego. Przykładem jest obliczenie gęstości na podstawie pomiaru masy i objętości. Prawidłowe wykonanie obliczenia gwarantuje, że wynik będzie taki sam, niezależnie od operatora. Badawcze metody obliczeniowe posługują się zaawansowanymi narzędziami, jak np. numeryczna metoda elementów skończonych, czy ściśle metody rozwiązywania równań różniczkowych. Jak to narzędzie zostanie wykorzystane, zależy od wiedzy i umiejętności, a przede wszystkim od znajomości zjawiska fizycznego i umiejętności jego odwzorowania w obliczeniach. Zmianie może ulegać zarówno model obliczeń, jak i założenia dotyczące warunków brzegowych, a wraz z nimi także wynik ostateczny. Wielkość zmian determinowana jest stopniem uogólnienia modelu obliczeniowego. Proste modele (np. elementy prętowe) nie są wrażliwe na zmiany, gdyż ich konstrukcja oparta jest na identycznych zasadach. Bardziej skomplikowane modele (np. powłoki, solidy) znacznie lepiej odwzorowują rzeczywistą konstrukcję, ale też są bardziej wrażliwe na zmiany, np. zastosowanie innego rodzaju elementu lub dyskretyzacji siatki może mieć wpływ na wynik obliczeń. Analiza prostych modeli jest łatwa, ale czasem niewystarczająca, bo

wyniki obliczeń ograniczają się zazwyczaj do podstawowych wartości w uogólnionych obszarach. Analiza modeli złożonych umożliwia uzyskanie precyzyjnych wyników w ściśle określonych obszarach. Innym rodzajem działań są obliczenia konstrukcji służące zaprojektowaniu budowli, które mają odmienny charakter od omawianych w artykule obliczeń mających na celu ustalenie charakterystyki wyrobu budowlanego.

Badania wyrobów metodami obliczeniowymi, zastępujące eksperyment, mają na celu ustalenie rzeczywistych parametrów danego wyrobu z jak najmniejszą niepewnością. Określone w ten sposób wartości, np. nośności czy wytrzymałości, stosowane są następnie do oceny wyrobu pod kątem możliwości jego zastosowania w warunkach, które zostały określone przez projektanta danej konstrukcji.

Kompetencje jednostek obliczeniowych

Obliczeniowe metody badawcze stosuje się często w przypadku wyrobów konstrukcyjnych, w odniesieniu do charakterystyk bezpośrednio związanych z bezpieczeństwem. Zachodzi zatem pytanie, **czy każdy, posiadając jakiegokolwiek algorytm obliczeniowy i dysponujący oprogramowaniem, może przeprowadzać badania metodami obliczeniowymi?** Jakie kryteria należy zastosować do oceny notyfikowanej jednostki obliczeniowej? Nie ma dokumentów, które stanowiłyby wspólne, europejskie kryteria oceny takiej jednostki. Zważywszy, że w większości krajów UE akredytacja jest podstawą notyfikacji, nie byłoby możliwości akredytacji takiej jednostki. Na jakiej zatem podstawie mogłaby się odbywać notyfikacja?

Organizacja zrzeszająca jednostki udzielające akredytacji (European co-operation for Accreditation) uznała, że metody pozwalające określać cechy wyrobów za pomocą obliczeń mogą podlegać takim sa-

* Instytut Techniki Budowlanej

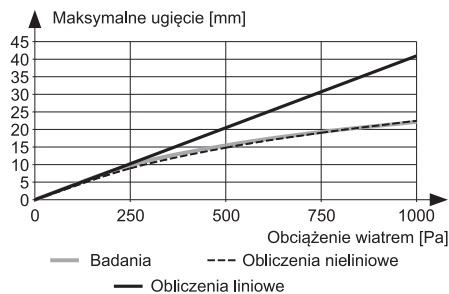
mym zasadom i kryteriom akredytacji jak metody eksperymentalne, co znalazło także wyraz w wymaganiach Polskiego Centrum Akredytacji. Podstawowe kryterium takiej akredytacji stanowi, podobnie jak w przypadku oceny kompetencji i akredytacji laboratoriów badawczych, norma PN-EN ISO/IEC 17025:2005 *Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących*.

Właściwe procedury i ich walidacja oraz niepewność wyników

Zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO/IEC 17025, do ustalenia właściwości wyrobu należy stosować odpowiednie metody i procedury, najlepiej znormalizowane. To dosyć ogólnie zapisane wymaganie ma bardzo istotne znaczenie w przypadku badań wykonywanych do celów oceny wyrobów. Stosowanie spójnych metod/procedur badawczych przez wszystkie laboratoria wykonujące badania danego typu wyrobów ma zapewniać porównywalność ich oceny przez różne laboratoria. Stąd zharmonizowane specyfikacje techniczne odnoszące się do wyrobów bardzo wyraźnie i jednoznacznie wskazują normy lub procedury, w których ma być przeprowadzone badanie. Niestety, nie są one jednoznacznie wskazywane w przypadku metod obliczeniowych i obecnie brakuje kryteriów doboru właściwych metod obliczeń. Przykładem może być zapis w zharmonizowanej normie wyrobu PN-EN 12566-1:2004P *Małe oczyszczalnie ścieków dla obliczeniowej liczby mieszkańców (OLM) do 50 – Część 1: Prefabrykowane osadniki gnilne pkt 5.2.4. wytrzymałość konstrukcji osadnika gnilnego powinna być określona odpornością na zgniatanie/odkształcenie pod maksymalnym obciążeniem, stosując metodę obliczeniową uznaną w kraju użytkowania lub metody badania opisane w załączniku D*. Dalej norma podaje jedynie ogólne założenia dotyczące obciążeń, bez wskazania co kryje się pod pojęciem *metoda obliczeniowa uznana w kraju użytkowania*. Konsekwencją takiego zapisu może być sytuacja, gdy wytrzymałość konstrukcji osadnika zostanie różnie oceniona przez różne jednostki (laboratoria) wykonujące obliczenia. Kluczowa do zrozumienia, dlaczego tak się może stać, jest mało rozpowszechniona wiedza o tym, że **rozbieżność pomiędzy wynikami obliczeń za pomocą różnych algorytmów i narzędzi oraz pomiędzy obliczeniem i eksperymentem, może być bardzo duża**. Wyniki uzyskane różnymi metodami obliczeniowymi przez różne laboratoria mogą różnić się w skrajnych przypadkach nawet kilkadziesiąt procent. Jako przykład przytoczyć można ana-

lizę przeprowadzoną w Instytucie Techniki Budowlanej, w ramach której porównano wyniki badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń liniowych i nieliniowych wielkoformatowej szyby zespolonej o wymiarach 3,3 x 3,0 m poddanej obciążeniu naporem wiatru w zakresie obciążeń od 0 Pa do 1000 Pa. Wynikiem eksperymentu i obliczeń są ugięcia szyby w środku rozpiętości pod narastającym obciążeniem wiatru (rysunek 1).

Linia prosta odwzorowuje wyniki obliczeń liniowych, zakrzywiona linia przerywana wyniki obliczeń nieliniowych, natomiast zakrzywiona linia ciągła wyniki badań. Jak widać na rysunku 1, do poziomu obciążenia 250 Pa wyniki badań i obliczeń są spójne. Po przekroczeniu tej wartości wyniki obliczeń liniowych odbiegają od wyników badań i obliczeń nieliniowych. W efekcie, w przypadku obciążenia maksymalnego, obliczenia liniowe **dają wynik dwukrotnie większy od wyników uzyskanych na podstawie badań**. Na tym samym wykresie widoczna jest również dobra zbieżność wyników obliczeń metodą nieliniową, dla której rozbieżność w porównaniu z badaniami przy maksymalnym obciążeniu wynosi ok. 6%.



Rys. 1. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i obliczeń metodą liniową i nieliniową

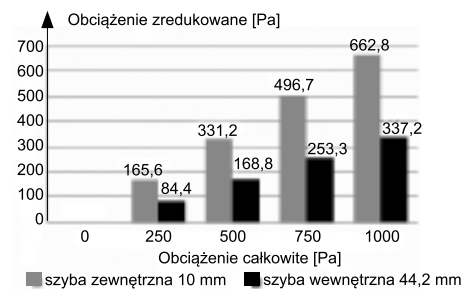
W analizowanym przykładzie wyraźny jest wpływ doboru modelu na wyniki. Większość prostych zagadnień inżynierskich można analizować, stosując liniowe metody analiz. Istnieje jednak grupa wyrobów, w przypadku których metody liniowe są nieodpowiednie i prowadzą do dużych błędów.

Odrębnym i bardziej skomplikowanym zagadnieniem jest dobór warunków brzegowych w ramach tego samego modelu obliczeniowego. Wówczas istotną rolę odgrywa znajomość rzeczywistych warunków obciążania i podparcia. W omawianym przykładzie szyby zespolonej, obliczenia ugięć i nośności wykonuje się oddzielnie dla każdej tafli szkła. Obciążenia wiatrem przyłożone jest do jednej (zewewnętrznej) tafli szkła, natomiast szyba wewnętrzna sprężona jest z wewnętrzną przez ośrodek gazowy umieszczony w komorze szyby zespolonej. Takie połączenie ta-

fli szkła wymaga rozdziału obciążeń na poszczególne tafle (B. Weller. *Glasbau – Praxis. Konstruktion und Bemessung*. Aufl. Berlin: Bauwerk 2010]. Wyniki zestawiono w tabeli i na rysunku 2.

Rozdział obciążeń

Obciążenie bazowe [Pa]	Obciążenie szyby zewnętrznej 10 mm [Pa]	Obciążenie szyby wewnętrznej 44,2 mm [Pa]
0	0	0
250	165,6	84,4
500	331,2	168,8
750	496,7	253,3
1000	662,8	337,2



Rys. 2. Graficzna prezentacja rozdziału obciążeń

Najczęstszym błędem w przyjmowaniu obciążeń jest jego nieprawidłowy rozdział (np. połowa obciążenia na zewnętrzną i połowa na wewnętrzną tafle) lub całkowite zaniebdywanie podziału, co oznacza, że do obliczeń przyjmuje się obciążenia znacznie wyższe, niż wynikałoby to z rzeczywistej pracy konstrukcji. Innym nie mniej ważnym zagadnieniem jest dobór prawidłowych warunków podparcia. W celu prezentacji różnic wynikających z innych założeń podparcia, wykonano obliczenia ugięć tafli szkła zewnętrznego przy maksymalnym obciążeniu. Przyjęto dwa przypadki:

- **przypadek 1:** podparcie przegubowe (dające możliwość tylko swobodnego obrotu) na obwodzie szyby,
- **przypadek 2:** podparcie przegubowe na dolnej krawędzi i przegubowo-przesuwne (dające możliwość swobodnego obrotu i przesuwu w płaszczyźnie oszklenia) na trzech pozostałych krawędziach.

Z obliczeń wynika, że w przypadku 1 ugięcie wynosi 12,5 mm, a naprężenie HMM 9,48 MPa, natomiast w przypadku 2 ugięcie wynosi 22,1 mm, a naprężenie HMM 18,6 MPa. Uzyskane wyniki obliczeń drastycznie się różnią, mimo że zastosowano tę samą nieliniową metodę obliczeń, ale przy różnych warunkach podparcia. Na uwagę zasługuje fakt, że prawidłowy wynik obliczeń (potwierdzony badaniami w opisywanym przykładzie) dotyczy drugiego wariantu podparcia, czyli z podporami

przegubowymi i przegubowo-przesuwymi. Pierwszy przypadek podparcia najczęściej stosowany jest przez projektantów, gdyż wykorzystywane są liniowe metody obliczeń, dla których zastosowanie zamiennie podpór przegubowych i przegubowo-przesuwanych nie zmienia wyniku. W związku z tym przyjmowanie założeń brzegowych powinno bazować nie tylko na wiedzy eksperckiej, ale też doświadczeniu laboratoryjnym.

Powtarzalność i odtwarzalność prostych modeli numerycznych jest stała i porównywalna ze ścisłymi metodami obliczeń pod warunkiem, że operator posługuje się tym samym zbiorem danych wejściowych. Inaczej jest w przypadku skomplikowanych modeli, np. powłokowych czy też solidowych (objętościowych), ponieważ pomimo posługiwania się tym samym zbiorem danych mogą wystąpić różnice w wynikach. Bardzo istotną rolę odgrywa sposób dyskretyzacji modelu obliczeniowego, tj. podział obiektu na siatkę elementów skończonych. Nieodpowiednie dobranie siatki może doprowadzić do powstania tzw. elementów zdegenerowanych, które w określonych obszarach diametralnie zaburzają wyniki i mogą prowadzić do błędów w ocenie wyrobu. Oczywiście istnieją metody kontroli i dostosowania siatek, jednak jest to proces trudny i pracochłonny, ale w niektórych przypadkach konieczny.

Wymagania, jakie powinna spełniać jednostka wykonująca obliczenia typu

Metody obliczeniowe, tak samo jak metody eksperymentalne wymagają walidacji i szacowania niepewności wyników (pkt. 5.4.5 i 5.4.6 PN-EN ISO/IEC 17025). Przy porównaniu obliczeń z badaniami należy dążyć do tego, aby błąd modelu obliczeniowego mieścił się w granicach niepewności pomiaru badawczej metody eksperymentalnej.

W przypadku oszacowania niepewności pomiaru w badaniach laboratoryjnych stosuje się znane metody. Znacznie trudniej jest oszacować błąd modelu obliczeniowego. Wówczas istotną rolę odgrywa stopień uproszczenia modelu i warunków brzegowych (sposób podparcia, oddziaływanie obciążeń itp.). Ostatecznie im bardziej model zbliżony jest do rzeczywistego elementu, tym wiarygodniej odwzorowuje się prawidłowe zachowanie wyrobu. Wyjściem z tej sytuacji jest zastosowanie numerycznych metod obliczeń. Nie są to metody ścisłe, jednak przy dużym skomplikowaniu geometrii i części składowych wyrobu dają zadowalające efekty. Istotną rolę odgrywa znajomość specyfiki wyrobu i jego przeznaczenia. Tak jak

w przypadku metod eksperymentalnych, powinny być opracowane instrukcje doprecyzowujące metodę obliczeniową. Rozbieżności w wynikach obliczeń w tym samym laboratorium, tą samą metodą przez dwie różne osoby bez doprecyzowania sposobu wprowadzania danych wejściowych i założeń wstępnych mogą sięgać w skrajnych przypadkach nawet kilkunastu procent. Jest to – podobnie jak w przypadku metod eksperymentalnych – tzw. odtwarzalność wewnątrzlaboratoryjna, która powinna być nadzorowana i uwzględniana w niepewnościach wyników.

W celu potwierdzenia kompetencji laboratorium do wykonywania badań metodami obliczeniowymi i ustalenia parametrów związanych z precyzją, należy prowadzić działania związane z jakością wyników (pkt 5.9 PN-EN ISO/IEC 17025), polegające m.in. na przystępowaniu do porównań międzylaboratoryjnych, a także – w ramach danego laboratorium – wykonywania badań porównawczych wyników obliczeń i eksperymentu na rzeczywistych obiektach badań w celu uwiarygodnienia obliczeń, zwłaszcza w przypadku wdrażania nowego modelu. Modele obliczeniowe, jak również same obliczenia powinny być potwierdzone laboratoryjnymi badaniami referencyjnymi na rzeczywistym obiekcie (przynajmniej raz dla danego modelu), co stanowi walidację metody obliczeniowej.

Kompetencje personelu (pkt. 5.2 normy PN-EN ISO/IEC 17025) powinny być na szczególnie wysokim poziomie. Istotna jest znajomość modeli obliczeniowych oraz metod badawczych eksperymentalnych i umiejętność weryfikacji i interpretacji otrzymanych wyników.

Wydaje się, że rozdziały normy PN-EN ISO/IEC 17025 dotyczące nadzoru nad wyposażeniem badawczym i zachowaniem spójności pomiarowej nie dotyczą metod obliczeniowych, ale z pewnością wyposażenie stosowane do obliczeń, w tym oprogramowanie, muszą być właściwie nadzorowane. EUROLAB (European Federation of National Associations of Measurement, Testing and Analytical Laboratories) opracował *Wytyczne do zarządzania komputerami i oprogramowaniem w odniesieniu do PN-EN ISO/IEC 17025* (wydanie polskie – Klub Polskich Laboratoriów Badawczych POLLAB, 2006), które powinny mieć zastosowanie także do nadzorowania komputerów i oprogramowania stosowanych w metodach obliczeniowych. Niezwykle ważne jest także nadzorowanie danych i wyników badań. Powinno być ono zgodne z wymaganiami pkt 4.13 i 5.4.7 PN-EN ISO/IEC 17025.

Sposób prowadzenia obliczeń typu

Obliczenia typu zwykle bazują na wstępnych badaniach materiałowych prowadzonych w laboratorium. Badania takie są konieczne do ustalenia danych wejściowych. Opieranie się na wartościach z tablic (zwykle parametry materiału podane w postaci widełek) może dawać wyniki o dużej rozbieżności, które nie będą kwalifikowały się do określenia właściwości użytkowych ani ustalenia typu danego wyrobu.

Badania wykonywane przez laboratorium w ramach jednych zasadniczych charakterystyk mogą służyć do ustalenia wartości wejściowych w obliczeniach innych, np. badania materiałowe służące do ustalenia trwałości, które są również wykorzystywane jako dane wejściowe do obliczenia wytrzymałości konstrukcji przydomowych oczyszczalni ścieków zgodnie z normą PN-EN 12566-3+A1: 2009P (*Małe oczyszczalnie ścieków dla obliczeniowej liczby mieszkańców (OLM) do 50 – Część 3: Kontenerowe i/lub montowane na miejscu przydomowe oczyszczalnie ścieków*).

Producent, ze względu na własną wygodę, często decyduje się na wykonanie w laboratorium notyfikowanym wszystkich badań, nie tylko tych, które zgodnie ze zharmonizowaną specyfikacją techniczną stanowią zadanie jednostki notyfikowanej. Oczywiście jest, że przeprowadzenie kompleksowych badań i obliczeń będzie bardziej wiarygodne, wygodniejsze i tańsze dla producenta niż rozdzielanie zadań pomiędzy laboratorium badawcze i jednostkę obliczeniową.

Podsumowanie

Ustalenie typu wyrobu w drodze obliczeń stanowi znaczne ułatwienie i obniżenie kosztów dla producentów. Zastąpienie eksperymentu obliczeniami jest możliwe tylko w niektórych przypadkach, gdy istnieją metody obliczeniowe, które mają zastosowanie w danym obszarze. Wyniki obliczeń będą spójne z rzeczywistymi właściwościami wyrobu tylko wtedy, gdy spełnionych zostanie wiele warunków zapewniających prawidłowość otrzymanych wyników. Kryteria oceny kompetencji do prowadzenia metod obliczeniowych są w praktyce takie same jak kryteria do prowadzenia badań metodami eksperymentalnymi i jako dokument odniesienia stosowana jest norma PN-EN ISO/IEC 17025.

Tworzenie „calculation bodies” nieprowadzących równocześnie działalności eksperymentalnej i nieocenianych wg wyżej wymienionych kryteriów jest ryzykowne, gdyż może prowadzić do powstawania błędów w ocenie właściwości wyrobu i w konsekwencji bezpieczeństwa jego użytkowania.