

WPŁYW FORMY PRZEKROJU POPRZECZNEGO WIEŻOWCÓW NA EFEKTYWNOŚĆ ICH KONSTRUKCJI

Zenon Rychter

Politechnika Białostocka, Wydział Architektury, ul. O. Sosnowskiego 11, 15-893 Białystok
E-mail: z.rychter@pb.edu.pl

TALL BUILDING CROSS SECTION SHAPE EFFECT ON STRUCTURAL EFFICIENCY

Abstract

The paper analyses the effect of the cross section shape of tall buildings on their structural efficiency under dynamic wind loading. Two types of thin-walled cross sections are investigated: closed tubes and open crosses. The tubes include circular, square, and triangular shapes. The crosses are square and triangular. Tall buildings with three types of silhouettes are studied: pyramids, rectangles, and barrels. The structural quality measure is the fundamental frequency of free bending vibrations. The fundamental frequencies are found numerically using the finite element method. A hierarchy of cross section shapes is established for the various silhouettes, involving fifteen cases. Tubes are found superior to crosses for all silhouettes. The best cross-section-silhouette combination is the circular pyramid. The worst are crosses with barrel silhouettes. The paper should assist architects in the conceptual design phase by putting side-by-side fifteen competing tall building design ideas with different structural merit.

Streszczenie

Praca analizuje wpływ formy przekroju poprzecznego wieżowców na efektywność ich konstrukcji w warunkach dynamicznego obciążenia wiatrem. Przedmiotem badań są dwa typy przekrojów poprzecznych: rury i krzyże. Rury obejmują formy koła, kwadratu i trójkąta. Wśród krzyży jest krzyż kwadratowy i trójkątny. Analizowane są trzy typy sylwet wieżowców: piramidy, prostokąty i beczki. Miarą efektywności konstrukcji wieżowca jest podstawowa częstość giętnych drgań własnych. Obliczenia częstości drgań wykonano metodą elementów skończonych. Ustalono hierarchię form przekrojów poprzecznych dla różnych sylwet wieżowców, obejmującą piętnaście przypadków. Stwierdzono, że rury są lepsze od krzyży dla wszystkich sylwet budynków. Najlepszą kombinacją formy przekroju poprzecznego i sylwety jest kołowa piramida. Najgorsze są krzyże o sylwecie baryłki. Praca winna wesprzeć architektów w konceptualnej fazie projektowania, zestawiając ze sobą piętnaście konkurencyjnych projektów budynków wysokich o różnej efektywności konstrukcyjnej.

Keywords: tall building architecture; cross-section shaping; structural efficiency

Słowa kluczowe: architektura wieżowców; kształtowanie przekroju; efektywność konstrukcji

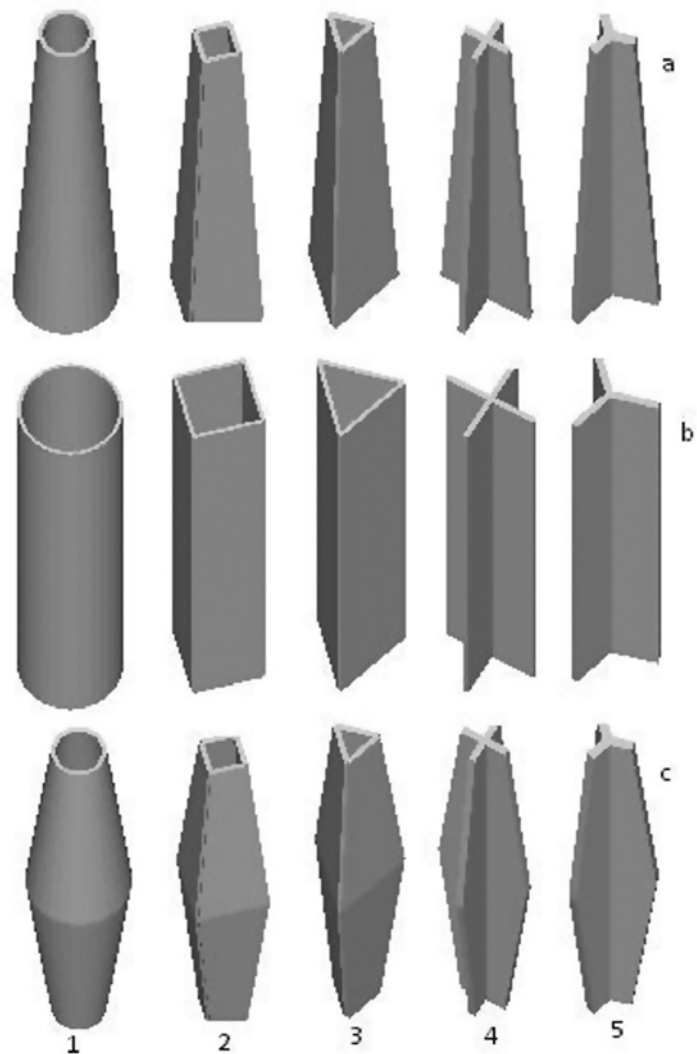
WPROWADZENIE

Kształt wpływa decydująco na jakość konstrukcji budowlanej¹. Czynnikiem ten jest szczególnie istotny w przypadku konstrukcji ekstremalnych, jakimi są wieżowce. Kształt wieżowca określają zasadniczo dwa składniki. Pierwszy składnik, najbardziej rzucający się w oczy, to sylweta. Drugi składnik to forma przekro-

ju poprzecznego. Obszerne informacje o kształtach wieżowców – zrealizowanych, planowanych i koncepcyjnych - zawiera baza danych² oraz artykuły^{3,4}. Wieżowce o interesujących w tej pracy, wystarczająco reprezentatywnych formach przekroju poprzecznego i sylwetach przedstawia ryc. 1.

Są tu dwa typy przekrojów poprzecznych i trzy sylwety. Pierwszy typ przekrojów to rury, a drugi to krzyże. Badane rury to rura okrągła, rura kwadratowa i rura trójkątna. Krzyże mają trzy lub cztery ramiona. Rozważane trzy sylwety wieżowców to piramidy, prostokąty i beczki (baryłki, ogórki). W sumie populacja badanych kształtów obejmuje $5 \times 3 = 15$ form, stanowiących kombinację pięciu (1-5) form przekroju poprzecznego i trzech (a,b,c) sylwet wieżowca. Formę a1, kołowej piramidy, ma *Aspire Tower*⁵ (wysokość 300 m) w Katarze. Formę a2, kwadratowej piramidy, ma londyński *The Shard*⁶ (wysokość 304 m) oraz średniowieczne (XII w.) wieże w Bolonii (wysokość 97 m). Formę a4, piramidy czteroramiennej (wysokość 457 m) ma *CN Tower*⁸ w Toronto. Formę a5, piramidy trójramiennej, mają: *Kingdom Tower*⁹ w Arabii Saudyjskiej (1007 m, najwyższy wieżowiec na świecie, w budowie), *Burj Khalifa*¹⁰ w Zjednoczonych Emiratach Arabskich (828 m, najwyższy wieżowiec na świecie) oraz *Ryugyong Hotel* w Korei Północnej (330 m, uznawany za najbrzydszy budynek na świecie¹¹). Formę b1, okrągłej rury cylindrycznej ma, *Temasek Tower*¹² w Singapurze (235 m, najwyższy na świecie budynek okrągły). Formę b2, kwadratowej rury o prostokątnej sylwecie, mają: *Tianjin Goldin Finance 117 Tower*¹³ w Chinach (597 m, w budowie) oraz nieistniejące już wieże *World Trade Center*¹⁴ w Nowym Jorku (417 m). Formę b3, trójkątnej rury o prostokątnej sylwecie, ma historyczny (1902 r.) budynek *Flatiron Building*¹⁵ w Nowym (21 pięter). Formę c1, okrągłej baryłki, mają: *30 St Mary Axe 'the Gherkin'*¹⁶ ('ogórek') w Londynie (180 m) oraz *Greenland Plaza*¹⁷ w Chinach (280 m). Formę c5, trójramiennej baryłki, kojarzonej z nierozwiniętym kwiatem lillii, ma projektowany dla Warszawy wieżowiec *Lilium Tower*¹⁸ (260 m).

Zasadniczym problemem w konstruowaniu wieżowców jest zapewnienie odporności na działanie



Ryc. 1. Sylwety i formy przekroju poprzecznego wieżowców: (a) piramidy, (b) prostokąty, (c) beczki; (1) rury kołowe, (2) rury kwadratowe, (3) rury trójkątne, (4) krzyże czteroramienne, (5) krzyże trójramienne; rys. autor

¹ A. Allen, W. Zalewski, *Form and forces. Designing efficient expressive structures*, Wiley, Hoboken NJ 2010, s. 622.

² *World's Tallest Buildings 2014*, <http://skyscraperpage.com/diagrams/?searchID=200> [dostęp: 20-06-2014].

³ *Skyscraper*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Skyscraper> [dostęp: 20-06-2014].

⁴ M.M. Ali, *The Skyscraper: Epitome of Human Aspirations*, 2005, <http://technicalpapers.ctbuh.org> [dostęp: 20-06-2014].

⁵ *Aspire tower*, <http://skyscrapercenter.com/doha/aspire-tower/> [dostęp: 20-06-2014].

⁶ *The Shard*, http://en.wikipedia.org/wiki/The_Shard [dostęp: 20-06-2014].

⁷ *Skyscraper*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Skyscraper> [dostęp: 20-06-2014].

⁸ *CN tower*, http://en.wikipedia.org/wiki/CN_Tower [dostęp: 20-06-2014].

⁹ *Kingdom Tower*, http://smithgill.com/media/pdfs/Kingdom_for_web_7.pdf [dostęp: 20-06-2014].

¹⁰ *Burj Khalifa*, http://en.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa [dostęp: 20-06-2014].

¹¹ *Ryugyong Hotel*, http://en.wikipedia.org/wiki/Ryugyong_Hotel [dostęp: 20-06-2014].

¹² *Temasek Tower*, http://en.wikipedia.org/wiki/Temasek_Tower [dostęp: 20-06-2014].

¹³ L. Peng, H. Goman, L.A. & Y. Chao, *Tianjin Goldin Finance 117 Tower: The Solution to a Slender Geometry*, 2012, <http://technicalpapers.ctbuh.org> [dostęp: 20-06-2014].

¹⁴ *The World Trade Center*, http://en.wikipedia.org/wiki/Construction_of_the_World_Trade_Center [dostęp: 20-06-2014].

¹⁵ *Flatiron Building*, http://en.wikipedia.org/wiki/Flatiron_Building [dostęp: 20-06-2014].

¹⁶ *30 St Mary Axe*, http://en.wikipedia.org/wiki/30_St_Mary_Axe [dostęp: 20-06-2014].

¹⁷ *Greenland Plaza*, <http://www.skyscrapercenter.com/zhengzhou/zhengzhou-greenland-plaza/645/> [dostęp: 20-06-2014].

¹⁸ *Lilium tower*, <http://www.zaha-hadid.com/architecture/lilium-tower/> [dostęp: 20-06-2014].

wiatru.^{19,20,21,22} Jest to problem zagwarantowania dostatecznej sztywności na zginanie, gdyż budynki wysokie pracują jak olbrzymie belki wspornikowe.²³ Statyczne parcie wiatru powoduje znaczne odchylenie wieżowca od pionu. Dynamiczne działanie wiatru, odrywającego się od budowli, może doprowadzić do niszczącego rezonansu – narastających drgań poprzecznych do kierunku wiatru. Drgania wieżowca mogą być przyczyną choroby lokomocyjnej użytkowników wysokich kondygnacji. Z wymienionych powodów efektywność konstrukcji wieżowca można mierzyć za pomocą tzw. podstawowej częstości drgań własnych. Są to drgania giętne budynku, kołyszącego się na wietrze. Wyższa częstość drgań, większa liczba drgań w jednostce czasu, oznacza konstrukcję sztywniejszą na zginanie, mniej odchylającą się od pionu, trudniejszą do rozkołysania przez wiatr, a więc lepszą.

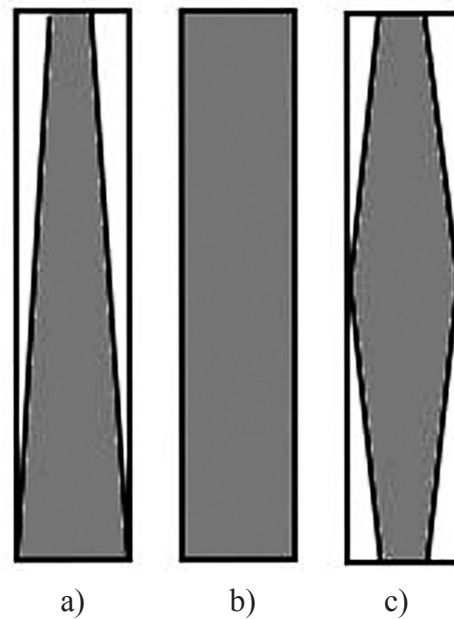
W pracy autora²⁴ wykonano analizę porównawczą sylwet wieżowców mających przekrój rury kołowej. W niniejszej pracy wykorzystano podstawową częstość drgań własnych do ustalenia hierarchii konstrukcji wieżowców o różnych formach przekroju poprzecznego i różnych sylwetach. W następnym punkcie pracy przedstawiono uproszczony model geometryczny badanych wieżowców, umożliwiając łatwe porównanie efektywności różnych konstrukcji. W kolejnym przedstawiono model obliczeniowy konstrukcji wieżowców w ramach metody elementów skończonych, w następnym natomiast hierarchię konstrukcji wieżowców o różnych formach przekroju poprzecznego i różnych sylwetach. Pracę kończy podsumowanie.

Praca jest adresowana do architektów zainteresowanych koncepcyjnym kształtowaniem wieżowców. Przedstawiona hierarchia form przekrojów poprzecznych i sylwet wieżowców ułatwia zorientowanie się w fizycznych możliwościach poszczególnych rozwiązań.

1. GEOMETRIA I MODEL OBLICZENIOWY

1.1. Geometria wieżowców

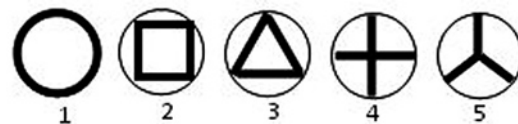
Ryc. 2 przedstawia sylwety rozważanych wieżowców.



Ryc. 2. Sylwety wieżowców: (a) piramida, (b) prostokąt, (c) beczka; prostokąt ograniczający 100x20m; rys. autor

Wszystkie badane wieżowce mają identyczną wysokość (100 m), średnicę maksymalną (20 m) i średnicę minimalną (10 m). Badane trzy sylwety – piramida, prostokąt i beczka – są wpisane w ten sam prostokąt, mają więc identyczne proporcje (5:1). Sylwety piramidy i prostokąta są klasyczne. Sylweta beczki to współczesna propozycja.

Wszystkie przekroje poprzeczne są wpisane w koło o średnicy 20 m - ryc. 3.



Ryc. 3. Przekroje poprzeczne wieżowców: (1) rura kołowa, (2) rura kwadratowa, (3) rura trójkątna, (4) krzyż czteroramienny, (5) krzyż trójramienny. Przekroje wpisane w koło średnicy 20m. Grubości ścianki różne – gwarantujące tę samą objętość materiału; rys. autor

¹⁹ M. Salvadori, *Why buildings stand up*, W.W. Norton & Company, New York 1990, s. 116.

²⁰ *Skyscraper*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Skyscraper> [dostęp: 01-05-2013].

²¹ P.A. Irwin, *Vortices and tall buildings: A recipe for resonance*, http://www.math.lsa.umich.edu/~krasny/math654_irwin.pdf [dostęp: 20-06-2014].

²² A. Abdelrazaq, K.J. Kim, J.H. Kim, *Brief on the Construction Planning of the Burj Dubai Project*, 2008, <http://technicalpapers.ctbuh.org> [dostęp: 20-06-2014].

²³ M. Salvadori, op.cit. s. 120.

²⁴ Z. Rychter, *Wpływ kształtu wieżowców na jakość konstrukcji*, „Architecturae et Artibus”, 2013, 2, 33-38.

Przekroje (1-3) to rury – kołowa, kwadratowa i trójkąta. Przekroje (4) i (5) to krzyż czteroramienny i krzyż trójramienny. Wszystkie przekroje są cienkościennie, płytowe. Grubość ściany każdego przekroju jest stała na wysokości budowli. Grubość ściany różnych przekrojów jest jednak różna (tab. 1) - ma zapewnić tę samą objętość materiału zużytego w każdym z wieżowców.

Tab. 1. Geometria wieżowców (grubsza ściana – ciemniejsza)

Przekrój	Sylweta		
	piramida a	prostokąt b	beczka c
	grubość [m]		
(1) koło	1.00	0.75	1.00
(2) kwadrat	1.08	0.81	1.08
(3) trójkąt	1.18	0.88	1.18
(4) krzyż 4	1.53	1.15	1.53
(5) krzyż 3	2.04	1.53	2.04
wszystkie	średnica maksymalna [m]		
	20	20	20
	średnica minimalna [m]		
	10	20	10
	wysokość [m]		
	100	100	100

Źródło: oprac. własne

Jako standard grubości (1 m) przyjęto ścianę piramidy kołowej (a1). Piramidy: kwadratowa, trójkątna, krzyżowa czteroramienna i trójramienna mają coraz większe grubości ścian, gdyż długość ich ścian w przekroju jest mniejsza niż obwód koła, muszą więc być grubsze od rury kołowej. Beczki mają te same grubości, co piramidy o analogicznych przekrojach. Sylwety prostokątne są w niektórych miejscach szersze od sylwet piramid i beczek. Z tego powodu przekroje poprzeczne sylwet prostokątnych są cieńsze od przekrojów sylwet piramidalnych i beczkowych. Generalnie najcieńszy jest przekrój (b1) rury kołowej o sylwecie prostokąta (0,75 m), a najgrubsze (2,04 m) są ściany trójramiennych krzyży o sylwecie piramidy i beczki (a5, c5).

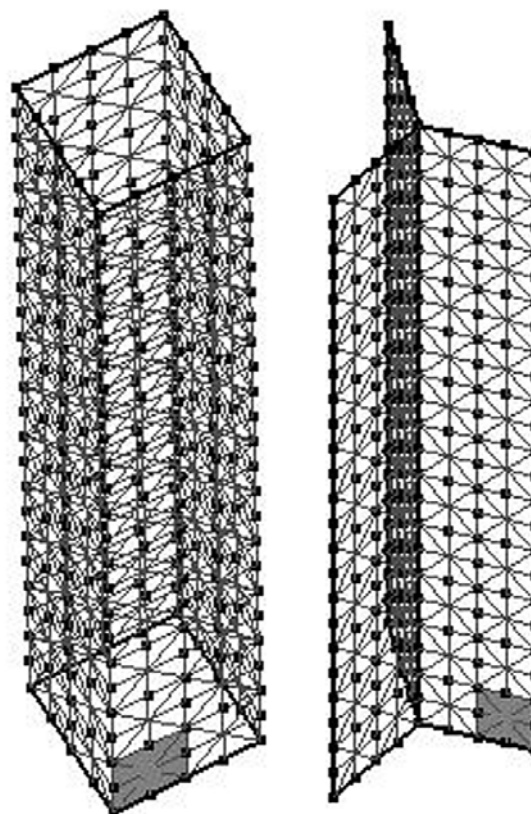
Przyjęte parametry geometryczne stwarzają warunki rzetelnej konkurencji między wieżowcami o różnych formach. Budynki mają identyczną wysokość, maksymalną średnicę, minimalną średnicę, a tym samym identyczne proporcje. Objętość materiału jest we wszystkich konstrukcjach identyczna – dzięki różnym grubościom ściany. Konkurencja między różnymi for-

mami wieżowców polega na różnym rozmieszczeniu, lepszym lub gorszym, tej samej ilości materiału.

Realne wieżowce mogą mieć inne wymiary (np. wysokość 1000 m) i proporcje od przyjętych w tej pracy. Budowle te są na ogół znacznie bardziej skomplikowane. Ich ściany są szkieletowe (perforowane), a grubość ścian rośnie od góry w kierunku podstawy. Wszystkie te odchylenia od przyjętych w tej pracy uproszczonych modeli geometrycznych nie wpływają jednak na wyniki pracy – hierarchię efektywności kształtów wieżowców. Hierarchia ta zależy od kształtów budowli i proporcji parametrów geometrycznych, a nie wartości bezwzględnych tych parametrów.

1.2. Model obliczeniowy

Modelowanie geometryczne oraz obliczenia częstości drgań własnych konstrukcji wieżowców wykonano metodą elementów skończonych, programem *CALCULIX*²⁵. W metodzie tej złożona konstrukcja o skomplikowanym zachowaniu jest dzielona na wiele małych, prostych geometrycznie i prosto się zachowujących 'cegielek' obliczeniowych, elementów skończonych (ryc. 4).



Ryc. 4. Model obliczeniowy metody elementów skończonych: węzły – czarne punkty, elementy – szare prostokąty; elementy są płytowo-powłokowe, 8-węzłowe; rys. autor.

²⁵ *CALCULIX*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Calculix> [dostęp: 20-06-2014].

Rozważane konstrukcje składają się z płyt. Do ich modelowania najprostsze jest zastosowanie 'cegł' płytowo-powłokowych (szare prostokąty na ryc. 4). Bardzo dokładne są 'cegły' 8-węzłowe, gdyż wzajemne przemieszczenia ich węzłów zapewniają modelowanie wszystkich deformacji płyt i powłok (zginanie, skręcanie, ściskanie, rozciąganie). Cegły o mniejszej liczbie węzłów są zbyt sztywne, niezbyt dokładne i trzeba ich użyć znacznie więcej (pojedynczy element nie daje się np. zgiąć).

Obliczenie częstości drgań własnych konstrukcji wymaga materiału sprężystego i obdarzonego masą. Do obliczeń przyjęto najprostszy model materiałowy. Materiał jest wszędzie identyczny (materiał jednorodny) i ma identyczne własności we wszystkich kierunkach (materiał izotropowy). Materiał jest liniowo (proporcjonalnie do deformacji) sprężysty. Przyjęte dane materiałowe są następujące:

- gęstość masy 2500 kg/m³,
- moduł sprężystości podłużnej (moduł Younga, sztywność przy ścisnaniu/rozciąganiu) 3·10⁹ kG/m²,
- współczynnik Poissona (stosunek deformacji poprzecznej do podłużnej – mało istotny) 0.16.

Są to cechy przeciętnego betonu konstrukcyjnego. Przyjęcie innych wartości, ważne w konkretnym realnym projekcie, nie wpłynie na wyniki tej pracy – hierarchię konstrukcyjną form wieżowców, gdyż wszystkim konkurentom przypisano ten sam materiał.

Realne wieżowce mają w całości lub w znacznej części (ściany zewnętrzne) konstrukcję szkieletową, prętową, a nie przyjętą w tej pracy konstrukcję płytową. Jednak pełna płyta jest zadowalającym, uproszczonym modelem płyty z regularną strukturą otworów (płyty perforowane lub szkieletowe) w zakresie zachowań całościowych, takich jak drgania giętne całego wieżowca, zachowującego się jak wielka belka wspornikowa. Proces homogenizacji, rozmazywania drobnych, regularnych struktur ma uzasadnienie matematyczne²⁶. Homogenizacja wieżowców szkieletowych jest w pełni zasadna w badaniach porównawczych konstrukcji, usuwając z pola widzenia skomplikowane i nieistotne szczegóły geometrii.

2. WYNIKI OBLICZEŃ I WNIOSKI

Tabela 2 przedstawia wyniki obliczeń podstawowej częstości drgań własnych badanych 15 wieżow-

ców, mierzącej ich efektywność - sztywność giętą, odporność na działanie wiatru. Efektywniejsze, sztywniejsze konstrukcje mają wyższą częstość drgań (wydają wyższy dźwięk, gdyby je usłyszeć). Dla większej czytelności wyników częstości drgań przeliczono na procenty. Konstrukcja najlepsza, o najwyższej częstości drgań ma efektywność 100%. Konstrukcje gorsze, o niższych częstościach mają efektywność poniżej 100%. Dodatkowo zmiany efektywności konstrukcji uwypuklono za pomocą odcieni szarości. Kolor biały odpowiada najwyższej efektywności, odcienie ciemniejsze oznaczają niższą efektywność.

Tab. 2. Efektywność konstrukcji – częstość drgań.
Lepiej = więcej = jaśniej. Jakość 100%=0,46 [drgań/sek]

Przekrój	Sylweta		
	piramida a	prostokąt b	beczka c
	jakość [%]		
(1) koło	100	90	55
(2) kwadrat	82	74	45
(3) trójkąt	72	65	41
(4) krzyż 4	59	53	33
(5) krzyż 3	59	53	33

Źródło: oprac. własne

Konstrukcją zdecydowanie najlepszą (efektywność 100%) wśród 15 konkurujących ze sobą wieżowców jest rura kołowa o sylwecie piramidy (a1). Zdecydowanie najgorsze (efektywność 33%) są przekroje krzyżowe: czteroramienny (c4) i trójramienny (c5), skojarzone z sylwetą beczki. Wieżowce tej formy drgają trzy razy wolniej od konstrukcji najlepszej. Mało efektywny jest beczkowy krzyż (c5) -planowany w Warszawie wieżowiec *Lilium Tower*²⁷. Jego stosunkowo niewielka wysokość (260 m) może być usprawiedliwieniem dla nowatorskiego, ale najmniej sztywnego kształtu przekroju poprzecznego i najgorszej sylwety, inspirowanych formą kwiatu lili (wysokie drzewa, które muszą stawić opór wiatrowi, nie mają ani formy przekroju poprzecznego ani sylwetki kwiatu lili, który swobodnie, bez oporu kołysze się na wietrze na wiotkiej łodydze).

Rury (1,2,3) to przekroje o wyraźnie wyższej efektywności od krzyży (4,5) dla wszystkich sylwet wieżowców (a,b,c) – piramidy, prostokąta i beczki. Piramidy i prostokąty (a,b) to sylwety zdecydowanie lepsze

²⁶ J. Fabricius, P. Wall, *Homogenization Theory and some of its applications*, 2008, http://www.ltu.se/cms_fs/1.52729/fabrici-wall.pdf [dostęp: 20-06-2014].

²⁷ *Lilium tower*, <http://www.zaha-hadid.com/architecture/lilium-tower/> [dostęp: 20-06-2014].

od beczek (c) dla wszystkich przekrojów poprzecznych. Wieżowce wysokiej klasy mają zatem przekrój poprzeczny rurowy (1,2,3) i sylwetę piramidy lub prostokąta (a,b). Co ciekawe, *Burj Khalifa*²⁸, najwyższy wieżowiec na świecie (828 m), oraz *Kingdom Tower*²⁹, znajdujący się w budowie wieżowiec jeszcze wyższy (1007 m), mają idealną sylwetę piramidy, ale skojarzoną z najgorszym przekrojem poprzecznym - krzyżem trójramiennym (a5). Efektywność konstrukcji tych rekordowych budowli to zaledwie 59% ideału. Oznacza to, że możliwe są wieżowce znacznie wyższe – duża rezerwa tkwi w formie przekroju poprzecznego, który nie powinien być krzyżem, lecz rurą, najlepiej okrągłą. Forma krzyża jest przyjmowana między innymi ze względu na podobieństwo do roślin pustynnych – ‘konstrukcji’ nieporównanie mniejszej skali od ekstremalnych wieżowców. Mało efektywne jest (55%) skojarzenie (c1) najgorszej, choć oryginalnej sylwety beczki (ogórka) z idealnym przekrojem koła. Zrealizowane budowle tego rodzaju nie są ekstremalnie wysokie: londyński *30 St Mary Axe*³⁰ ‘the Gherkin’ (ogórek) ma wysokość 180 m, a chiński *Greenland Plaza*³¹ osiąga 280 m. Uproszczone prace teoretyczne³², oparte na statyce wspornika obciążonego siłą skupioną na końcu, sugerujące optymalność sylwety beczki w budynkach wysokich, nie znajdują potwierdzenia w wynikach przeprowadzonej w tej pracy analizy dynamiki wieżowców metodą elementów skończonych. Efektywność okrągłych wieżowców beczkowych (c1) jest niska (55%), nieznacznie niższa od efektywności (59%) krzyżowych wieżowców piramidalnych (a5). W obu przypadkach mamy do czynienia z półszlachetnymi hybrydami – doskonałego przekroju poprzecznego skojarzonego ze złą sylwetą lub idealnej sylwety skojarzonej z mało sztywnym przekrojem.

Wieżowce najniższej klasy (c4, c5) to połączenia słabej sylwety (beczka) i nieszywnego przekroju poprzecznego (krzyże), ustroje podobne do nierozwiniętego kwiatu lili. Są to formy nowatorskie, ale konstrukcyjnie nieatrakcyjne, oderwane od realiów pracy wieżowców. Krzyż trójramienny jest konstrukcyjnie równoważny czteroramiennemu, dla wszystkich rodzajów sylwet. Zamiana jednego krzyża na drugi zmienia wygląd wieżowca, ale nie wpływa na efektywność jego konstrukcji.

Czysto jakościowym podsumowaniem powyższych wyników jest ranking wieżowców, (tab. 3).

Tab. 3. Efektywność konstrukcji wieżowców – ranking; lepiej = jaśniej

Przekrój	Sylwetka		
	piramida a	prostokąt b	beczka c
	ranking		
(1) koło	1	2	9
(2) kwadrat	3	4	12
(3) trójkąt	5	6	13
(4) krzyż 4	7-8	10-11	14-15
(5) krzyż 3	7-8	10-11	14-15

Źródło: oprac. własne

W pierwszej kolejności należy unikać sylwet beczkowych (kolumna c), a w drugiej przekrojów poprzecznych krzyżowych (wiersze 4,5). Najgorsza jest kombinacja beczki i krzyża (c4, c5). Dwaj liderzy rankingu (a1, b1) mają formy naturalne, podobne do pni drzew – okrągły przekrój poprzeczny i piramidalną lub prostokątną sylwetę. Kolejne dwie pozycje (a2, b2) zajmują konstrukcje o sylwetach liderów, ale mniej naturalnych, kanciastych, kwadratowych przekrojach poprzecznych. Kolejne dwie pozycje (a3, b3) mają także sylwety liderów, ale ich trójkątne przekroje poprzeczne są bardziej odległe od ideału – okręgu – niż kwadraty. Sylwety beczkowe (c) i przekroje krzyżowe (4, 5) to formy spotykane w naturze, ale nie są to formy odpornych na wiatr drzew ani sztywnych wieżowców.

Przedstawiony ranking form konstrukcji wieżowców oparty jest na ważnym, ale tylko jednym kryterium: częstotliwości drgań własnych, związanej ze sztywnością na zginanie i odpornością na działanie wiatru. Znaczenie tego – czysto fizycznego - kryterium rośnie wraz z wielkością wieżowca, ale nie jest to kryterium jedyne w projektowaniu architektonicznym³³.

PODSUMOWANIE

W pracy przeanalizowano wpływ formy przekroju poprzecznego na efektywność konstrukcji wieżowców o różnych sylwetach, poddanych dynamicznemu działaniu wiatru. Zbadano piętnaście budynków o pięciu formach przekroju poprzecznego i trzech sylwetach. Przekroje poprzeczne to cienkościenne rury – okrągła, kwadratowa i trójkątna – oraz krzyże o czterech i trzech ramionach. Sylwety wieżowców to

²⁸ *Burj Khalifa*, http://en.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa [dostęp: 20-06-2014].

²⁹ *Kingdom Tower*, http://smithgill.com/media/pdfs/Kingdom_for_web_7.pdf [dostęp: 20-06-2014].

³⁰ *30 St Mary Axe*, http://en.wikipedia.org/wiki/30_St_Mary_Axe [dostęp: 20-06-2014].

³¹ *Greenland Plaza*, <http://www.skyscrapercenter.com/zhengzhou/zhengzhou-greenland-plaza/645/> [dostęp: 20-06-2014].

³² A. Allen, W. Zalewski, *Form and forces. Designing efficient expressive structures*, Wiley, Hoboken NJ 2010, s. 488.

³³ J. Sławińska, *Ekspresja sił w nowoczesnej architekturze*, Arkady, Warszawa.

piramida, prostokąt i baryłka. Efektywność konstrukcji – jej sztywność na zginanie - oceniono za pomocą podstawowej częstości giętych drgań własnych wieżowca, obliczając ją metodą elementów skończonych. Ustalono hierarchię efektywności form przekrojów poprzecznych dla różnych sylwet wieżowców. Pokazano, że przekroje rurowe są wyraźnie lepsze od przekrojów krzyżowych dla wszystkich sylwet. Najlepsza kombinacja formy przekroju poprzecznego i sylwetki wieżowca to rura kołowa o kształcie piramidy. Najgorszą kombinacją są przekroje krzyżowe w połączeniu z sylwetką baryłki. Praca pokazuje całe spektrum potencjalnych konstrukcji o zróżnicowanej efektywności, ułatwiając architektom projektowanie koncepcyjne kształtów wieżowców, ich przekrojów poprzecznych i sylwet.

LITERATURA

1. **Abdelrazaq A., Kim K.J., Kim J.H. (2008)**, *Brief on the Construction Planning of the Burj Dubai Project*, <http://technicalpapers.ctbuh.org> [dostęp: 20-06-2014].
2. **Ali M.M. (2005)**, *The Skyscraper: Epitome of Human Aspirations*, <http://technicalpapers.ctbuh.org> [dostęp: 20-06-2014].
3. **Allen A., Zalewski W. (2010)**, *Form and forces. Designing efficient expressive structures*, Wiley, Hoboken NJ.
4. **Fabricious J., Wall P. (2008)**, *Homogenization Theory and some of its applications*, http://www.ltu.se/cms_fs/1.52729!/fabrici-wall.pdf [dostęp: 20-06-2014].
5. **Irwin P.A. (2010)**, *Vortices and tall buildings: A recipe for resonance*, http://www.math.lsa.umich.edu/~krasny/math654_irwin.pdf [dostęp: 20-06-2014].
6. **Peng L., Goman H., Chao L., A. & Y. (2012)**, *Tianjin Goldin Finance 117 Tower: The Solution to a Slender Geometry*, <http://technicalpapers.ctbuh.org> [dostęp: 20-06-2014].
7. **Rychter Z. (2013)**, *Wpływ kształtu wieżowców na jakość konstrukcji*, „Architecturae et Artibus” 2, 33-38.
8. **Salvadori M. (1990)**, *Why buildings stand up*, W.W. Norton & Company, New York.
9. **Sławińska J. (1997)**, *Ekspresja sił w nowoczesnej architekturze*, Arkady, Warszawa.

ŹRÓDŁA INTERNETOWE

1. *Aspire tower*, <http://skyscrapercenter.com/doha/aspire-tower/> [dostęp: 20-06-2014].
2. *Burj Khalifa*, http://en.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa [dostęp: 20-06-2014].
3. *CALCULIX*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Calculix> [dostęp: 20-06-2014].
4. *CN tower*, http://en.wikipedia.org/wiki/CN_Tower [dostęp: 20-06-2014].
5. *Flatiron Building*, http://en.wikipedia.org/wiki/Flatiron_Building [dostęp: 20-06-2014].
6. *Greenland Plaza*, <http://www.skyscrapercenter.com/zhengzhou/zhengzhou-greenland-plaza/645/> [dostęp: 20-06-2014].
7. *Kingdom Tower*, http://smithgill.com/media/pdfs/Kingdom_for_web_7.pdf [dostęp: 20-06-2014].
8. *Lilium tower*, <http://www.zaha-hadid.com/architecture/lilium-tower/> [dostęp: 20-06-2014].
9. *Ryugyong Hotel*, http://en.wikipedia.org/wiki/Ryugyong_Hotel [dostęp: 20-06-2014].
10. *The Shard*, http://en.wikipedia.org/wiki/The_Shard [dostęp: 20-06-2014].
11. *Skyscraper*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Skyscraper> [dostęp: 20-06-2014].
12. *Temasek Tower*, http://en.wikipedia.org/wiki/Temasek_Tower [dostęp: 20-06-2014].
13. *World's Tallest Buildings 2013*, <http://skyscraperpage.com/diagrams/?searchID=200> [dostęp: 20-06-2014].
14. *The World Trade Center*, http://en.wikipedia.org/wiki/Construction_of_the_World_Trade_Center [dostęp: 20-06-2014].
15. *30 St Mary Axe*, http://en.wikipedia.org/wiki/30_St_Mary_Axe [dostęp: 20-06-2014].

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego S/WA /1/11 Politechniki Białostockiej. Autor wyraża podziękowanie anonimowej osobie recenzującej za szczegółowe uwagi ulepszące terminologię i poszerzające bibliografię.