

Budynki wysokie o kondygnacjach podwieszonych

High-rise buildings with suspended storeys

DOI: 10.15199/33.2021.12.06

Streszczenie. W artykule podjęto próbę przybliżenia zagadnień dotyczących kształtowania konstrukcji wieżowców ze stropami podwieszonymi do trzonu nośnego. Współczesne realizacje takich budynków są często znacznymi modyfikacjami konstrukcji nazywanych systemami wieszarowymi, które powstały w latach sześćdziesiątych XX w. Modyfikacje dotyczą przede wszystkim systemów konstrukcyjnych. W rozwiązaniach architektonicznych, jak na początku, podstawową zasadą jest możliwość uwolnienia dolnych kondygnacji od słupów zewnętrznych. W przypadku współczesnych złożonych form systemów konstrukcyjnych tworzone są modele numeryczne, które umożliwiają uwzględnienie przestrzennej pracy konstrukcji. Daje to możliwość modyfikacji starszych, znacznie prostszych, systemów konstrukcyjnych i tworzenia zaskakujących przestrzennie, dynamicznych, lekkich optycznie budynków, stanowiących kontrast w stosunku do rozwiązań tradycyjnych.

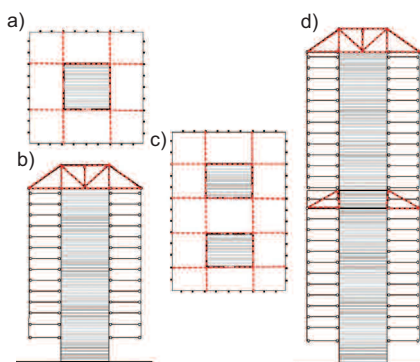
Słowa kluczowe: budynek wysoki; system konstrukcyjny; ustrój „wieszarowy”; konstrukcje trzonowe.

Abstract. This article attempts to present the issues related to the shaping of the structure of high-rise buildings with ceilings suspended from the load-bearing core. Contemporary realizations of buildings with suspended storeys are often considerable modifications to structures called suspension systems, which were created in the 1960s. The modifications concern mainly construction systems. In architectural solutions, as in the beginning, the basic principle is the possibility of freeing the lower storeys from external columns. For modern complex forms of structural systems, numerical models are created to account for the spatial work of the structure. This allows for the modification of older, much simpler, structural systems and the creation of spatially surprising, dynamic, optically light buildings that contrast with traditional solutions.

Keywords: high-rise building; structural system; „suspension” structure; core structures.

Współczesne rozwiązania budynków o kondygnacjach podwieszonych bazują na systemach wieszarowych (rysunek 1). Zasada ich działania polega na oparciu kondygnacji na trzonie konstrukcji wsporczej (kratownicowej), do której podwieszane są ciężne nośne podtrzymujące stropy, które mogą być mocowane także bezpośrednio do głowicy trzonu. W budynkach o stropach podwieszonych występowały najczęściej masywne trzony centralne, które najlepiej pracowały przy pełnej symetrii geometrii budynku [2].

Budynki o konstrukcji bezpośrednio podwieszanej do trzonu wymagały odpowiedniego ukształtowania głowicy. Zaletą takich rozwiązań było wyeliminowanie kratownicowych elementów zginanych (wieszarów), natomiast wadą konieczność wydłużenia trzonu, gdyż ciężna musza być instalowane pod odpowiednim kątem. Zbyt mały kąt (mniejszy od 30°), powoduje niewłaściwy rozkład sił od ciężna podtrzymującego stropy. Powstają duże składowe po-



Rys. 1. Schematy ustrojów wieszarowych – kratownicowych: a) rzut budynku jedno-trzonowego; b) przekrój z kratownicą wieszarową; c) rzut budynku wielotrzonowego; d) budynki sekcyjne – dwuwspornikowe

Rys. 1. Cała
Fig. 1. Diagrams of suspension systems – truss systems: a) single-core buildings – plan; b) cross-section with a suspension truss; c) multi-core buildings – plan; d) sectional buildings – two-cantilever

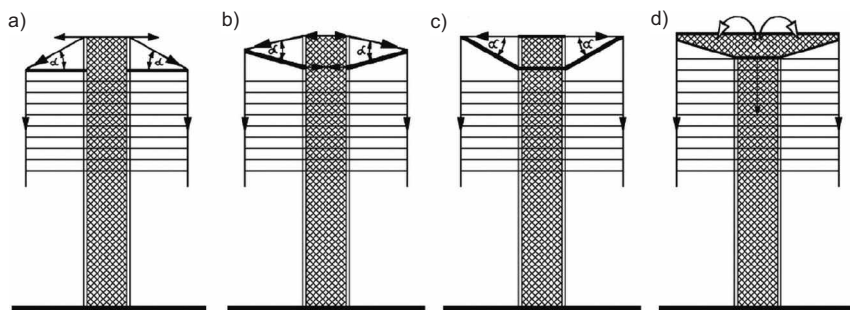
ziome, które muszą być przeniesione przez element rozporowy w poziomie ostatniego stropu. Schematy ustrojów wieszarowych przedstawiono na rysunku 2. Trzony takich budynków były całkowicie ściskane, z niewielkim wpływem zginania od poziomego działania sił wiatru oraz zjawisk sejsmicznych. Próbowano również tworzyć układy,

w których liny były sprowadzane do fundamentu, co umożliwiała wciągnięcie ich do współpracy z trzonem [2]. Takie rozwiązanie nie pozwala jednak na uwolnienie kondygnacji parteru od słupów poza trzonem. W przypadku budynków wielotrzonowych często występowały duże trudności technologiczne związane z koniecznością wyrównania różnicy odkształceń trzonów.

Pierwsze budynki o kondygnacjach podwieszonych powstały w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX w. Od samego początku myślano o modyfikacji podstawowego układu konstrukcyjnego. Najbardziej innowacyjne podejście zaproponował Norman Foster w wieżowcu HSBC w Hongkongu, ukończonym w 1985 r., mającym 42 kondygnacje nadziemne i 4 podziemne (fotografia 1). Skratowaną konstrukcją ramową połączył z wieszarowo ukształtowanymi kratownicami opartymi na dwóch trzonach, do których zostały podwieszane stropy kondygnacji pośrednich budynku [8, 10].

Zanim Norman Foster przedstawił ostateczny projekt budynku w konkursie na „najlepszy budynek na świecie”, zostało wykonanych wiele koncepcji.

¹⁾ Politechnika Warszawska; Wydział Architektury; ireneusz.cala@pw.edu.pl



Rys. 2. Schematy ustrojów wieszarowych: a) cięgna mocowane bezpośrednio do trzonu; b) i c) kształtowanie elementu rozporowego ze zmianą kąta ustawienia; d) mocowanie cięgna do sztywnej głowicy wspornikowej

Rys. 1. Cała na podstawie [2]

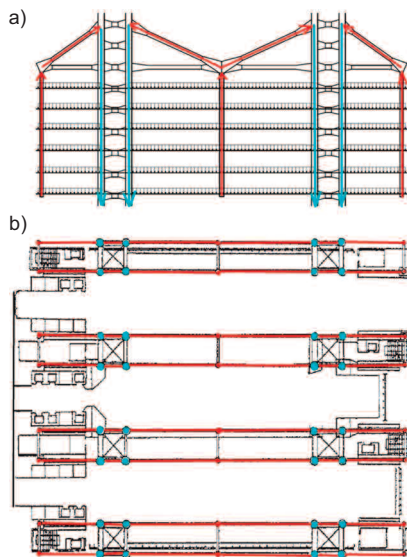
Fig. 2. Diagrams of suspension systems: a) rods attached directly to the core; b) and c) shaping of the expanding element with the change of the setting angle; d) attaching rods to a rigid support head



Fot. 1. Bank Hongkongu i Szanghaju – Hong Kong
Fot. By WiNG, CC BY 3.0
Photo 1. Hong Kong and Shanghai Bank - Hong Kong

W związku z tym, że budynek miał powstać w miejscu istniejącego obiektu, który miał być sukcesywnie demontowany w czasie budowy, konieczne było zastosowanie konstrukcji podwieszanej na dwóch trzonach umieszczonych obok budynku istniejącego. Norman Foster zaproponował zbliżenie trzonów do środka budynku i zastosowanie lin symetrycznie po dwóch stronach obu trzonów. Ostatecznie okazało się, że można zachować nieznaczną nieosiowość i podzielić budynek na mniej sekcji. Konstrukcja wieszarowa została usytuowana poza obrysem funkcjonalnym wieżowca. W ostatecznym rozwiązaniu budynek ma pięć sekcji w części najwyższej (środkowej), a po cztery i trzy sekcje w dwóch częściach niższych. Każdy rygiel ramy ma wysokość dwóch kondygnacji. W celu zapewnienia

sztywności przestrzennej, układ ramowy zastosowano także prostopadle do „ram wieszarowych” (rysunek 3). Są to skratowania umieszczone na tych samych poziomach co wieszary, do których podwieszono stropy. Dowolność kształtowania stropów pozwoliła architektom na utworzenie kilkukondygnacyjnych atriów wewnątrz budynku, do których dostęp jest z poziomu wielu stropów. Obecnie takie rozwiązanie nie byłoby możliwe do zastosowania ze względów przeciwpożarowych. W czasie wznoszenia budynku przepisy były znacznie bardziej liberalne niż teraz [3].

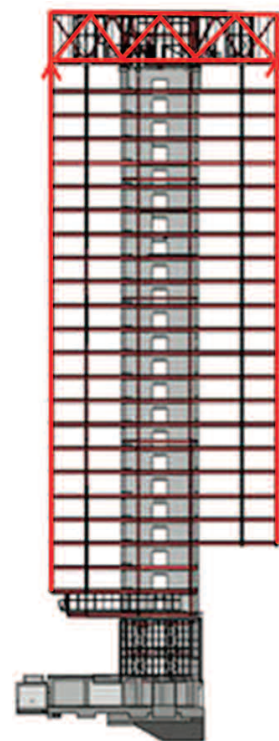


Rys. 3. Budynek HSBC – zasada pracy więźarów i układu ramowego: a) praca układu wieszarowego; b) usytuowanie wieszarów na rzucie budynku

Rys. 1. Cała na podstawie [3]

Fig. 3. HSBC building – the principle of work of trusses and frame system: a) suspension system work; b) location of the hangers on the building plan

W 2016 r. oddano do użytkowania budynek 111 Main w Salt Lake City w Utah (USA) o wysokości 108,3 m (25 kondygnacji nadziemnych) [11], w którym w dość specyficzny sposób zastosowano konstrukcję wieszarową (rysunek 4). Dolna jego część zajmuje całą działkę, a część kondygnacji jest nadwieszona. Budynek ma konstrukcję trzonową, a na dwudziestej piątej kondygnacji umieszczony został ruszt kratownicowy, do którego mocowano po obwodzie rozciągane słupy podtrzymujące stropy. Na każdej elewacji jest po



Rys. 4. Przekrój budynku 111 Main w Salt Lake City w Utah (USA)

Rys. 1. Cała na podstawie [4, 5]

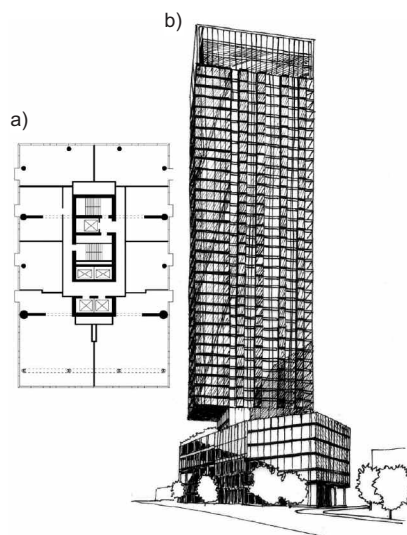
Fig. 4. Section of building 111 Main in Salt Lake City, Utah (USA)

pięć cięgien. Konieczny więc był ruszt kratownicowy oparty na trzonie. W miejscach oparcia kratownic (6 punktów) zastosowano przegubowe łożyska sferyczne [4, 5]. Stalowy dwukierunkowy system kratownicowy to ok. 1870 t stali konstrukcyjnej na 18 podwieszonych kolumnach obwodowych. Prawie 40% obciążeń własnych i grawitacyjnych budynku jest przenoszonych z kratownic dachowych na szczyt nadbudowy żelbetonowej ściany szkieletowej za pośrednictwem sześciu stalowych łożysk konstrukcyjnych. System obsługuje 20 po-

ziomów zawieszenia po stronie południowej kończących się na poziomie 5 i 23 poziomy zawieszenia po stronie wschodniej, zachodniej i północnej kończące się na poziomach 2 i 3, aby kolumny obwodowe nie dotykały gruntu. Taki układ konstrukcji spowodował powstanie mimośrodów obciążenia względem osi obojętnych trzonu i fundamentów, które także musiały być odsunięte od sąsiedniego budynku teatru. Zastosowano pale stalowe, które zrównoważyły powstałe mimośrodowe, a od strony teatru dodatkowo ściany szczelinowe [1].

W związku z tym, że stalowa konstrukcja stropów podwieszona do głowicy mogła znacznie wychylić się w czasie trzęsienia ziemi, wprowadzono dodatkową konstrukcję podwieszającą na poziomie niższych stropów. Ustrój kablowy, do którego zawieszono stropy w linii elewacji, odciążał dodatkowo głowicę dachową opartą na trzonie, ale także stabilizował budynek w czasie trzęsień ziemi. W ścianach trzonu wyprofilowano tzw. ustrój siodłowy, w który wprowadzono kabel nośny [1]. Podstawową funkcją systemu kablowego było uzyskanie osiowego przekazywania sił od trzonu budynku, w czasie trzęsień ziemi, na ruszt będący oczepem fundamentowego systemu palowego. System głębokiego fundamentowania budynku składa się z 373 wbijanych pali stalowych HP, sięgających do głębokości co najmniej 100 stóp poniżej poziomu gruntu. Środek ciężkości systemu pali został wycentrowany ze środkiem ciężkości trzonu żelbetowego, aby zminimalizować obciążenie mimośrodowe.

Wsporniki w budynkach wysokich realizowane są m.in. z zastosowaniem konstrukcji stropów podwieszonych do trzonu budynku. Tak pracują konstrukcje trzonowe-wieszarowe, ale również stosowane są układy podwieszane skośnymi cięgnami biegnącymi na wysokości budynku wewnątrz jego bryły. Jest to więc modyfikacja tradycyjnego systemu, a specyfika rozwiązań jest bardzo różnorodna. W taki sposób zostało zrealizowane nadwieszenie części wysokiej w budynku **Cosmopolitan w sąsiedztwie placu Grzybowskiego w Warszawie** (rysunek 5), który ma wysokość 160 m (41 kondygnacji nadziemnych i 4 pod-



Rys. 5. Cosmopolitan Tower Warszawa: a) rzut na poziomie podwieszenia; b) widok elewacji

*Rys. 1. Cała na podstawie [3]
Fig. 5. Cosmopolitan Warsaw Tower: a) suspension level plan; b) view of the façade*

ziemne) [3]. Konstrukcja budynku jest szkieletowo-trzonowa. Trzon ma długość 20,0 m i szerokość 7,0 m, a stosunek wysokości budynku do szerokości trzonu wynosi $H/B = 160,0 \text{ m}/7,0 \text{ m} = 1/23$. Mniej sztywny trzon przy przyspieszeniu $p = 1,4\%$ powoduje, że maksymalne teoretyczne wychylenie wieży wynosi ok. 14,5 cm.

Płyty stropowe są monolityczne, sprężone i pracują dwukierunkowo. Podstawowa grubość stropów wynosi 23 cm, ale lokalnie są pogrubione. Sprężenie stropów wykonano metodą Freyssineta (kablobeton). W celu zmniejszenia ciężaru stropów umieszczano w betonie kształtki odciążające z tworzywa sztucznego. Cechą charakterystyczną tego wieżowca jest podcięcie na całej szerokości od strony południowej na wysokości $17,5 \div 32,0 \text{ m}$ nad poziomem terenu. Efektowi przestrzennemu towarzyszyły poważne problemy w rozwiązaniu konstrukcyjnym. Kondygnacje nadwieszane zostały wysunięte w stosunku do kondygnacji niższych o 11,7 m. Rozwiązanie takie w sensie statycznym jest przewieszonym wspornikiem, przenoszącym bardzo duże obciążenia z wyższych kondygnacji na sztywny trzon. Cała konstrukcja nad podcięciem została podzielona na trzy sekcje, każda po 11 kondygnacji. Sekcje mają swoją konstrukcję podwieszoną. Płyty stropowe zostały oparte na systemie dwukondy-

gnacyjnych kratownic stalowych o rozpiętości 22,4 m, podtrzymujących 4 stropy. Kratownice nie mają krzyżulca w polu środkowym, co oznacza, że jest to fragment ze sztywnymi węzłami (zasada typu Vierendeela). Stropy wszystkich kondygnacji są oparte na słupach, a kratownice, cofnięte o ok. 2,0 m od płaszczyzny ścian osłonowych, oparto na wieszakach skośnych przenoszących siły na kolejny, wyższy poziom dolnych pasów kratownic. Składowe siły z wieszaków są przenoszone przez słupy narożne (siły pionowe) oraz przez stropy (siły poziome) na wewnętrzny trzon. W miarę wzrostu wysokości, zwiększa się obciążenie wspornika, a także asymetryczne obciążenie trzonu. W związku z tym trzon betonowano z odpowiednim, skokowym przesuwaniem jego środka geometrycznego na osi północ – południe [3].

Wszystkie słupy budynku są żelbetowe. Grubość ścian trzonu została zróżnicowana, poczynając od 70 cm na dole do 40 cm na kondygnacjach najwyższych. Słupy okrągłe o średnicy $40 \div 140 \text{ cm}$ wykonano z betonu B60, a ściany z B50. Na wyższych kondygnacjach klasa betonu była mniejsza. Wieżowiec posadowiono na płycie fundamentowej lokalnie wzmocnionej baretami o długości 19,0 m. Jej grubość pod trzonem wynosi $4,4 \div 5,2 \text{ m}$ (głębokie podszybia wina), poza nim 2,4 m, a poza obrysem wieży 1,2 m.

Skomplikowany technicznie **budynek hotelu Nhow** (fotografia 2) o wysokości 91,0 m (25 kondygnacji nadziemnych i 2 podziemne) powstaje w Amsterdamie [12]. Ma to być największy hotel Beneluksu z 650 pokojami. Rzut budynku jest trójkątny, a jego bryła składa się z trzech części obróconych o 30° tak, że są one elementami wspornikowymi. Wierzchołki każdego trójkąta zostały wysunięte na 12,5 m poza fasadę dolnego lub górnego trójkąta. Wsporniki są znacznie większe, ponieważ w linii elewacji nie ma konstrukcji, a konstrukcja wsporników mocowana jest w trzonie żelbetowym. Trzon i tarcze żelbetowe w dolnej części budynku zostały wykonane z betonu wysokiej wytrzymałości C90/105, dzięki czemu mogą mieć tę samą grubość na całej wysokości budynku, mimo większych naprężeń w dolnej części trzonu.



SODASIL – TiO₂ Extender

– lepsze krycie, wzrost stopnia białości,
– obniżenie kosztów produkcji dzięki zmniejszeniu udziału TiO₂



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

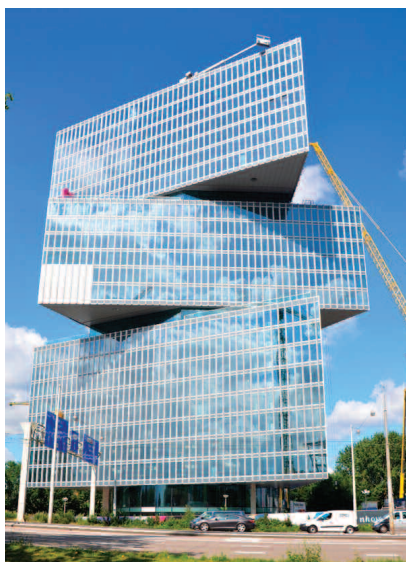
Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbolcel@jrs.pl



Fot. 2. Hotel Nhow Amsterdam RAI w czasie budowy

Fot. M. Cala

Photo 2. Nhow Amsterdam RAI hotel under construction

Dużą trudnością była perforacja tarcz w miejscu połączenia ze ścianami trzonu. Kilkukondygnacyjne tarcze musiały zostać odsunięte od trzonu, aby stworzyć przestrzeń komunikacyjną. Połączone są z trzonem na poziomie każdego stropu za pomocą belek stalowych, zabetonowanych w stropach, które przenoszą odpowiednie siły poziome, tworząc pary sił przenoszące zginanie. Ścinanie musiało być przekazane na dodatkową kolumnę usytuowaną pod tarczą jak najbliżej trzonu (poza otworami komunikacyjnymi). Prostopadle do tarcz mocowane są kratownice o wysokości jak tarcza (4 – 5 sztuk). Stropy po stronie trzonu są żelbetowe pełne, a w części przewieszanej zespolone z blachami fałdowymi. Do trzonu zamocowano po 6 tarcz na trzech wysokościach. Mimo że układ jest w miarę symetryczny, występowały znaczne siły skręcające, zarówno od niesymetryczności obciążenia tarczami, jak i ze względu na skomplikowane siły wiatru przy dość nieregularnej bryle budynku. Niezbędne okazały się testy w tunelu aerodynamicznym, aby określić dokładne siły działające na płaszczysty boczny elewacji oraz na powierzchnie dolne wystających części budynku [7, 9].

Skomplikowanym elementem budynku były także fundamenty. Nie tylko ze względu na specyfikę obciążeń, przekazywanych przez trzon budynku, ale tak-

że na jego otoczenie. Z jednej strony bardzo blisko części podziemnej przebiega linia metra, a z drugiej autostrada A10 [6]. Dwukondygnacyjne podziemie wykonano w obudowie ścian szczelinowych, a budynek posadowiono na płycie żelbetowej pogrubionej w obrysie trzonu i wzmocnionej palami. Ściana szczelinowa nie tylko ograniczała wpływ tunelu na budynek, ale również izolowała go od drgań wynikających z użytkowania zarówno metra, jak i trasy szybkiego ruchu. Okazało się, że od strony metra będzie konieczna dodatkowa palisada żelbetowych pali, aby izolacja od drgań była efektywna.

Konstrukcje wieszarowe pozwalają tworzyć oryginalne i dynamiczne formy przestrzenne, lekkie optycznie wskutek uwolnienia parteru oraz stanowią kontrast w stosunku do budynków tradycyjnych.

Literatura

- [1] Jardine K.; P. Lee. 111 Main An Office Tower That Hangs from its Hat Over a Theater - CTBUH 2018 Tall+Urban Innovation Conference.
- [2] Pawłowski Adam Zbigniew. 1976. Kształtowanie i konstruowanie wysokich budynków trzonowych. Warszawa. COBPBO.
- [3] Pawłowski Adam Zbigniew; Ireneusz Cała. 2013. *Budynki wysokie*. Warszawa. Oficyna Wydawnicza PW.
- [4] Sarkisian Mark, Peter Lee, Alvin Tsui, Lachezar Handzhiyski. 2016. „Hat Truss-Supported Office Tower in Salt Lake City. *Structure Magazine*, str. 32 – 35.
- [5] Sarkisian Mark; Peter Lee, Alvin Tsui, Lachezar Handzhiyski. 2016. „Performance-Based Design of 111 Main in Salt Lake City”. *Structure Magazine*, str. 51 – 54.
- [6] Schoenmakers S., D-J. Kluff. Gedraaide volumes vragen om inventieve constructie nhowRAI Hotel – www.cementonline.nl/nhowrai_hotel?file=1510230082.1534.pdf; dostęp 08.09.2021.
- [7] van der Beek P. Iconisch Amsterdamse Zuidsherbert Benelux' grootste hotel; [Stedenbouw.nl – https://pleijsierbouw.nl/wp-content/uploads/2018/11/SB-752-nhow-hoofdartikel.pdf](https://pleijsierbouw.nl/wp-content/uploads/2018/11/SB-752-nhow-hoofdartikel.pdf); dostęp 08.09.2021.
- [8] www.arup.com/projects/hbsc-headquarters-1-queens-road-central; dostęp 08.09.2021.
- [9] www.emporis.com/buildings/1254099/nhow-amsterdam-rai-amsterdam-netherlands; dostęp 08.09.2021.
- [10] www.fosterandpartners.com/projects/hongkong-and-shanghai-bank-headquarters/; dostęp 08.09.2021.
- [11] www.skyscrapercenter.com/building/111-main/15807; dostęp 08.09.2021.
- [12] www.skyscrapercenter.com/building/nhow-amsterdam-rai-hotel/19459; dostęp 08.09.2021.

Przyjęto do druku: 29.10.2021 r.