

JERZY JANUSZ
WOJCIECH JANUSZ

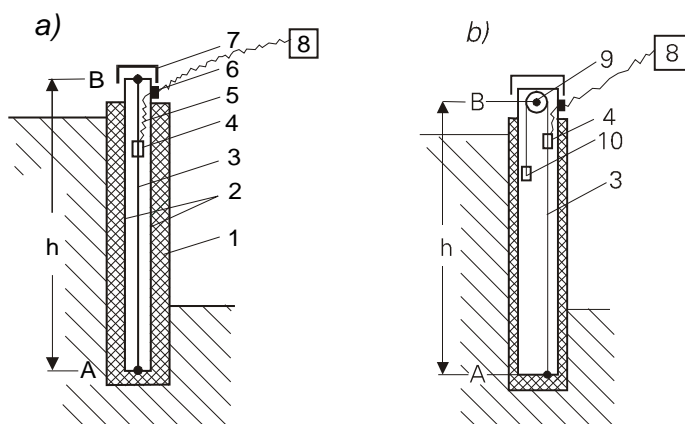
MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA INKLINOMETRU CIĘGNOWEGO W BADANIACH STANU BEZPIECZEŃSTWA BUDOWLI

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 9T12E 028 16 dofinansowanego przez Komitet Badań Naukowych i w ramach tematu statutowego nr S /6-7

ZARYS TREŚCI: Omówiono budowę, zasadę działania, warunki konstrukcyjne i możliwe zastosowania inklinometru ciągnowego.

1. WPROWADZENIE

W pracach [2], [4], [5] przedstawiony został opracowany w IGiK inklinometr IS do pomiaru zmian nachylenia i ugięć ściany szczelinowej w profilu pionowym. Inklinometr taki daje możliwość wyznaczenia poziomych przemieszczeń ścian na poziomach różniących się wielokrotnością 1 m lub 1,5 m od najniższego poziomu, znajdującego się na wysokości dna rury zastabilizowanej w ścianie szczelinowej, tj. kilkanaście centymetrów nad podstawą ściany. Dzięki temu możliwe jest konfrontowanie zmierzonych in situ przemieszczeń z wynikami obliczeń projektowych dotyczących pracy ściany szczelinowej w zmiennych warunkach obciążenia i podparcia w trakcie wykonywania wykopu i podziemnych kondygnacji wznoszonego budynku. Uzyskanie takich danych wymaga okresowych pomiarów inklinometrem, wykonywanych przez wyspecjalizowany zespół geodezyjny.



Rys. 1

W wielu przypadkach zainteresowania odbiorcy wyników nie muszą sięgać tak daleko i mogą ograniczać się do wyznaczania poziomych przemieszczeń ściany szczelinowej na jej górnym poziomie, znajdującym się w strefie posadowienia fundamentów sąsiadujących budynków, w stosunku do podstawy ściany szczelinowej. Do tego celu może być użyty inklinometr ścięgowy [11], przedstawiony schematycznie na rysunku 1a.

2. BUDOWA INKLINOMETRU CIĘGNOWEGO

W celu zainstalowania takiego inklinometru należy w ścianie szczelinowej (1) zastabilizować stalową rurę osłonową (2) w pozycji w przybliżeniu pionowej, lecz z zachowaniem jej prostoliniowości z taką tolerancją, aby z góry widoczny był fragment dna, tj. aby możliwe było bezstykowe napięcie cięgna (3) między punktami *A* i *B*. Cięgno to zostaje następnie naciągnięte siłą gwarantującą praktyczną (tj. w granicach dokładności pomiaru) niezmiennosc kształtu krzywej jego zwisu.

Krzywą zwisu cięgna napiętego między punktami *A* i *B* jest krzywa łańcuchowa [3], która wobec w przybliżeniu pionowego usytuowania cięgna na odcinku *AB* jest bardzo zbliżona do prostej i przy zachowaniu stałej i odpowiednio dużej siły naciągu praktycznie niezmienna. Z tego właśnie powodu rura osłonowa (2) i cięgno (3) powinny być wykonane z materiału o praktycznie jednakowym współczynniku rozszerzalności termicznej, a siła naciągu powinna być zbliżona do siły na granicy sprężystości cięgna. Innym rozwiązaniem, prowadzącym do zachowania stałej siły naciągu, jest zamontowanie w punkcie *B* bloczka (9) jak na rysunku 1b, przełożenie cięgna przez ten bloczek i zawieszenie na nim obciążnika (10).

Do ciągną przytwierdzony jest sensor nachyleń (4), którego środek ciężkości znajduje się na osi ciągną. Sensor ten może być przytwierdzony do ciągną w dowolnym miejscu, najkorzystniej jednak jest przytwierdzić go w pobliżu miejsca zamocowania ciągną. Sensor (4) połączony jest kablem transmisyjnym (5) z gniazdem (6) przytwierdzonym do zewnętrznej powierzchni rury (2). Rura (2) zostaje po zainstalowaniu aparatury zamknięta hermetycznie i zabezpieczona osłoną (7). W przypadku, gdy następuje zmiana nachylenia i ugięcie ściany szczelinowej, to punkt *B* przytwierdzenia górnego końca ciągną przemieszcza się w przybliżeniu poziomo względem punktu *A* – dolnego końca ciągną. Sensor nachylenia (4) reaguje na wynikającą z tego zmianę nachylenia ciągną i generuje sygnał proporcjonalny do tej zmiany. Do pomiaru nachylenia i zmiany nachylenia służy przenośne urządzenie pomiarowe lub rejestracyjne (8) łączone kablem z gniazdem (6) na rurze (2). W wersji odczytowej urządzeniem takim jest woltomierz, połączony w jednej obudowie z przetwornikiem sygnałów sensora i zespołem zasilającym.

Wyznaczanie poziomych przemieszczeń górnej powierzchni ściany szczelinowej względem jej podstawy może być wykonywane samodzielnie przez przeszkolonego pracownika technicznego na budowie.

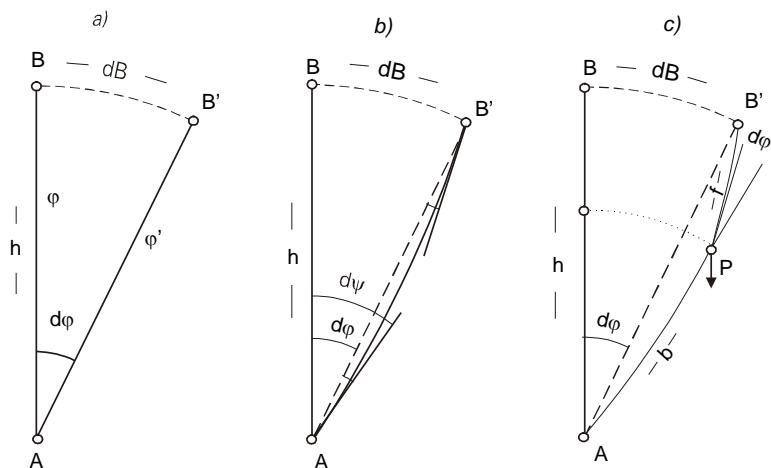
Inklinometr ciągnowy może być zbudowany jako samodzielny przyrząd, bądź też może być częścią konstrukcji inklinometru w formie ruchomej sondy, jak inklinometr opisany w [2]. W tym ostatnim przypadku inklinometr ciągnowy składa się ze struny napiętej między końcami korpusu w postaci rury i sensora nachyleń przymocowanego do struny, mieszczącego się w rurze. Takie rozwiązanie inklinometru chroni go przed szkodliwymi skutkami ewentualnego wygięcia korpusu (rury) w trakcie trwania pomiaru i umożliwia posługiwanie się inklinometrem w jednym położeniu (bez odczytów rewersyjnych).

3. ZASADA DZIAŁANIA I WARUNKI KONSTRUKCYJNE INKLINOMETRU CIĄGNOWEGO

Przy posługiwaniu się inklinometrem ciągnowym przyjmujemy założenie, że nieznaczne odchylenie ciągną od pionu, wynikające z przemieszczenia punktu *B* do pozycji *B'*, nie powoduje ugięcia ciągną, w związku z czym, zgodnie z rysunkiem 2a, zmiana odczytu sensora pochylenia $d\varphi = \varphi' - \varphi$, gdzie: φ – odczyt przy pozycji pionowej, φ' – ponowny odczyt przy pozycji odchylonej od pionu, umożliwia obliczenie przemieszczenia $dB = B' - B$ z wzoru:

$$dB = \frac{h \cdot d\varphi}{\rho} \quad (1)$$

W rzeczywistości ciężno, które przy usytuowaniu punktów A, B na linii pionu układa się wzdłuż prostej pionowej, po przemieszczeniu punktu B do pozycji B' przyjmuje kształt krzywej łańcuchowej jak na rysunku 2b, w związku z czym zmiana odczytu sensora $d\psi$ mierzona od stycznej do tej krzywej, różni się od $d\varphi$ z rysunku 2a (jest mniejsza przy umieszczeniu sensora blisko punktu B i większa w przypadku umieszczeniu go w pobliżu punktu A). Zadanie polega na tym, by różnica $d\psi$ między kątem nachylenia stycznej do krzywej łańcuchowej w punkcie przytwierdzenia sensora a kątem $d\varphi$ nachylenia ciężwiwy była zanedbywalnie mała. Przy użyciu algorytmu 2⁰ [3] wykonano w tym celu obliczenia różnic $d\psi - d\varphi$ przy zróżnicowanych wartościach h , dB i sił S naciągu ciężna, ustalając optymalne wymagania konstrukcyjne, przy których różnice te są zanedbywalnie małe.



Rys. 2

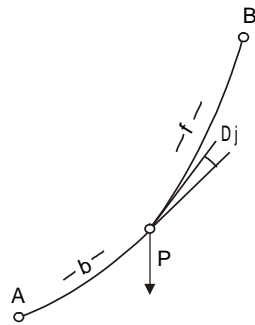
Jeśli jednak dodatkowo uwzględnimy fakt, że sensor przytwierdzony do ciężna w pewnej odległości od punktu B ma pewną masę P , to krzywa zwisu ciężna odchylonego od pionu staje się krzywą załamaną w punkcie przytwierdzenia sensora, składającą się z dwu odcinkowych krzywych łańcuchowych b i f jak na rysunku 2c (por. [3]). Kąt między stycznymi do tych krzywych łańcuchowych w punkcie przytwierdzenia masy P sensora wynosi zgodnie z [3]:

$$\Delta\varphi = \frac{P}{H(1 + \operatorname{tg}\varphi_f \cdot \operatorname{tg}\varphi_b)} \quad (2)$$

gdzie: H – pozioma składowa siły S naciągu ciągną, φ_f – kąt nachylenia stycznej do krzywej łańcuchowej f , φ_b – kąt nachylenia stycznej do krzywej łańcuchowej b , (por. rys. 3).

Wobec tego, że $H = S \cos \varphi$, gdzie φ – kąt nachylenia stycznej do ciągną w punkcie przyłożenia siły S , to przy założeniu $\varphi_f \cong \varphi_b = \varphi$, możemy zapisać:

$$\Delta\varphi = \frac{P}{S \cos \varphi (1 + \operatorname{tg} \varphi_f \cdot \operatorname{tg} \varphi_b)} \cong \frac{P}{S} \cos \varphi \quad (3)$$



Rys. 3

Problem polega na takim dobraniu wartości parametrów P , S , aby kąt $\Delta\varphi$ i jego zmiany przyjmowały wartości zanedbywalnie małe. Jak widać ze wzoru (3), decydujące znaczenie ma tu osiągnięcie małej wartości stosunku P/S , to jest dobranie ciągną o dużej powierzchni przekroju, aby można było zastosować dostatecznie dużą siłę naciągu. Zauważmy, że przy $\varphi = 100^\circ$, $\cos \varphi = 0$, lecz w miarę odchylenia ciągną od pionu, jego wartość szybko rośnie.

Przyjmując np. za zanedbywalną wartość $\Delta\varphi \leq 20''$ otrzymamy przy $\varphi = 99,9^\circ$ i przy $P = 0,1 \text{ kg}$, $S = 5 \text{ kg}$. Z tego wynika, że aby nie przekroczyć naprężenia $\sigma = 25 \text{ kg/mm}^2$, uznawanego za zbliżone do znajdującego się na górnej granicy sprężystości stali, należy przyjąć powierzchnię przekroju ciągną $F = 0,2 \text{ mm}^2$, tj. $\phi \geq 0,5 \text{ mm}^2$. Gdy chcemy, aby wpływ masy skupionej P sensora na zmienność kąta między stycznymi był mniejszy, to trzeba zastosować większą siłę naciągu S i większą średnicę ciągną.

Po zbudowaniu prototypu inklinometru ciągnowego z uwzględnieniem wyników analizy wyżej wymienionych czynników przeprowadzono jego testowanie na stanowisku, gdzie punkt B , tj. górny koniec cięgna przytwierdzony był do ruchomego suportu, którego przemieszczenia poziome mierzono bezpośrednio, za pomocą śruby mikrometrycznej, z błędem 0,01 mm. Jak wykazały pomiary doświadczalne na stanowisku testowym, przy użyciu inklinometru ciągnowego możliwe jest wyznaczanie przemieszczeń poziomych punktu B w stosunku do punktu A z błędem $1,25 \cdot h \cdot 10^{-5}$, gdzie: h – różnica wysokości. Oznacza to, że przemieszczenie wierzchołka ściany o wysokości $h = 10$ m jest wyznaczane z błędem średnim 0,12 mm w stosunku do jej podstawy.

4. MOŻLIWE ZASTOSOWANIA INKLINOMETRU CIĘGNOWEGO

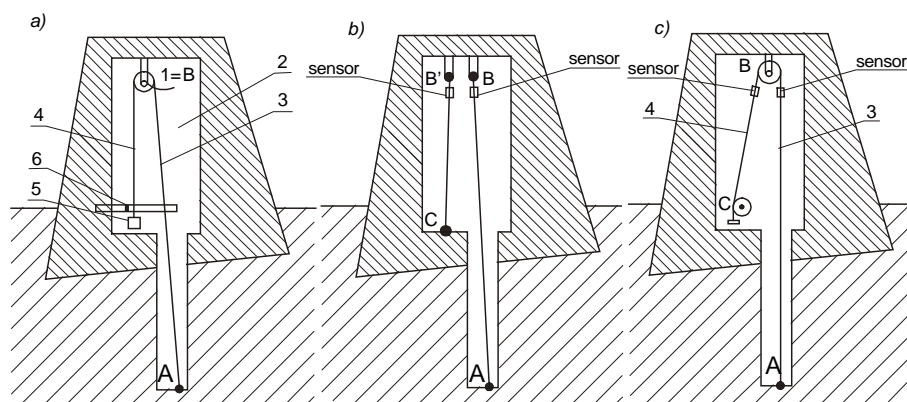
Przy użyciu inklinometru ciągnowego można wyznaczać, w zależności od potrzeb, jedną lub dwie dowolnie zorientowane składowe poziomego przemieszczenia punktu B względem punktu A , przytwierdzając do cięgna jeden lub dwa odpowiednio skierowane sensory nachylenia.

Inklinometr ciągnowy może być z powodzeniem stosowany do pomiarów przemieszczeń zapór wodnych względem punktów dolnego zamocowania cięgien inklinometrów zainstalowanych w szybach kontrolnych. Punkty te mogą znajdować się w korpusie zapory lub w podłożu, poniżej korpusu.

Szczególnie interesująca jest możliwość zastąpienia dwoma inklinometrami ciągnowymi dotychczas stosowanego wahadła dyferencyjnego, które służyło do jednoczesnego wyznaczania poziomych przemieszczeń podstawy i korony zapory względem punktu znajdującego się na dużej głębokości w podłożu, na dnie wykonanego w nim odwiertu. Wahadło dyferencyjne, według [6], pokazane schematycznie na rysunku 4a, składa się z bloku (1) przytwierdzonego w pionowym szybie (2) bezpośrednio pod koroną zapory, odcinka cięgna (3) przytwierdzonego w punkcie A na dnie otworu wykonanego w podłożu pod zaporą i przełożonego przez blok (1) odcinka (4) tego samego cięgna, zwisającego swobodnie pod działaniem obciążnika (5). Bezpośrednio nad obciążnikiem (5) do ściany szybu przytwierdzona jest konsola (6) służąca do jednoznacznego, wielokrotnego mocowania przyrządu pomiarowego, którym mierzy się odległości poziome od obydwu odcinków cięgna w dwu prostopadłych do siebie kierunkach. Na podstawie takich powtarzanych pomiarów można obliczać poziome przemieszczenia punktu B pod koroną zapory i punktu C nad podstawą zapory względem punktu A znajdującego się w podłożu pod zaporą.

Zastąpienie takiego wahadła dyferencyjnego inklinometrami ciągnowymi ilustruje rysunek 4b. Zgodnie z tym rysunkiem, jedno cięgno zostaje napięte między punktem A na dnie otworu wiertniczego

i punktem B pod koroną zapory, zaś drugie między punktem B' pod koroną zapory i punktem C w korpusie zapory u jej podstawy. Na obu ciągnach w pobliżu punktów pod koroną zapory umocowane są parami sensory skierowane prostopadle do siebie, dzięki czemu wyznaczaniu podlegają zmiany nachyleń ciągnię w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych i wyznaczone są poziome przemieszczenia punktu B względem punktu A oraz punktu C względem punktu B' w prostokątnym układzie współrzędnych poziomych. W rezultacie przyjęcia, że punkty B, B' nie zmieniają wzajemnego położenia, możliwe staje się wyznaczanie przemieszczeń punktów B, C względem punktu A .



Rys. 4

Dwa inklinometry ciągnowe zastępujące wahadło dyferencyjne można też zainstalować w sposób zilustrowany na rysunku 4c, wykorzystując wcześniej istniejące wahadło dyferencyjne i tylko odchylając od pionu odcinek (4) ciągną za pomocą dodatkowego bloczka w punkcie C .

Walorem zastąpienia wahadła dyferencyjnego przez dwa inklinometry ciągnowe, zainstalowane jak na rysunku 4bc, staje się możliwość łatwego zautomatyzowania wyznaczania przemieszczeń punktów B, C zapory względem punktu A .

Inklinometr ciągnowy może też służyć do wyznaczania zmian nachylenia wysokich budynków w przypadku umieszczenia go w szybie windowym, między ścianą a prowadnicą. Udowodniły to badania eksperymentalne inklinometru zainstalowanego bez rury osłonowej, podlegającego w pewnym stopniu wpływom oddziaływania ruchu powietrza na ciągną, jednak, jak się okazało, bez złych skutków dla wyników.

Inklinometr ciągnowy może być użyty do ciągłego monitorowania poziomych przemieszczeń fundamentów budowli posadowionych w strefach

potencjalnego zagrożenia zjawiskami osuwiskowymi, omówionymi szczegółowo np. w [10].

W tych przypadkach długość bazy inklinometru ciągnowego, tj. pionowa odległość między praktycznie stałym punktem *A* osadzonym w głębi podłoża, a przemieszczającym się punktem *B* na poziomie fundamentu, ograniczona jest jedynie umiejętnością wywiercenia w podłożu w przybliżeniu pionowego otworu, spełniającego wymagania prostoliniowości w stopniu umożliwiającym bezstykowe naciągnięcie w nim ciężna. Otwór może być odchylony od pionu dość znacznie, bowiem zakres pomiarowy inklinometru sięga 55 mm/m. Przy głębokości takiego otworu dochodzącej do 80 m możliwe jest wyznaczanie poziomych przemieszczeń fundamentu budynku z błędem poniżej 1 mm.

Zespół odpowiednio rozmieszczonych inklinometrów ciągnowych, osadzonych w piwnicach budynków znajdujących się na Skarpach Wiślanych w Sandomierzu, Płocku, Warszawie, czy też w razie potrzeby na innych obiektach wymagających ochrony, np. na Wawelu w Krakowie, może przyczynić się do znacznego ograniczenia innych czaso- i pracochłonnych pomiarów przemieszczeń poziomych, prowadzonych np. metodą poligonizacji precyzyjnej [1], a jednocześnie znacznie przyspieszyć bieżące informowanie o stanie bezpieczeństwa skarpy i znajdujących się na niej budynków. Wynika to z małej pracochłonności pomiarów przy użyciu inklinometru ciągnowego, a także łatwej możliwości ich zautomatyzowania.

LITERATURA

- [1] Dąbrowski T.: *Monitorowanie przemieszczeń Skarpy Płockiej*. Konf. nt. przemieszczeń..., Płock 22.05.1998.
- [2] Janusz J., Janusz W., Kołodziejczyk M., Wasilewski J.: *Inklinometr IS do pomiaru zmian nachylenia i ugięć ścian szczelinowych*. Prace IGIK 1999 T. 46 z. 98.
- [3] Janusz J.: *Metodyka geodezyjnego badania naprężeń i wydłużeń lin w konstrukcjach ciągnowych*. Prace IGIK 1996 T. 43 z. 94.
- [4] Janusz J.: *Aparatura do pomiarów przemieszczeń ścian szczelinowych oraz budynków istniejących w otoczeniu głębokich wykopów*. Inżynieria i Budownictwo 1998 z. 12.
- [5] Janusz J.: *Aparatura do wyznaczania przemieszczeń, ugięć i zmian nachylenia ścian szczelinowych oraz zmian nachylenia i ugięć fundamentów budynków istniejących w otoczeniu głębokich wykopów*. Biuletyn Informacyjny BOINTiE Instytutu Geodezji i Kartografii 1998 z. 3–4.
- [6] Lazzarini T.: *Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia*. Warszawa: PPWK 1977.

- [7] Michalak H., Pęski S., Pyrak S., Szulborski K.: *O wpływie wykonywania wykopów głębokich na zabudowę sąsiednią*. Inżynieria i Budownictwo 1998 z. 1.
- [8] Szulborski K.: *Konstrukcyjne i realizacyjne przyczyny katastrofy obudowy wykopu budynku EUROPLEX w Warszawie*. Konf. nt. Urzędu Wojewódzkiego w Warszawie, 30.09.1998.
- [9] Wysokiński L.: *Geotechniczne przyczyny katastrofy obudowy wykopu przy ulicy Chocimskiej w Warszawie*. Konferencja nt. Urzędu Wojewódzkiego w Warszawie, 30.09.1998.
- [10] Wysokiński L.: *Zabezpieczenie Skarpy Płockiej i jego uwarunkowania*. Konf. nt. przemieszczeń..., Płock 22.05.1998.
- [11] Janusz J.: *Inklinometr cięgnowy*. Inżynieria i Budownictwo 1999 z. 7/8.

*JERZY JANUSZ
WOJCIECH JANUSZ*

POSSIBILITIES OF USING STRING INCLINOMETERS FOR EXAMINING SAFETY STATE OF CONSTRUCTIONS

S u m m a r y

The article includes description of the inclinometer used for determining changes of inclination of string, which is placed approximately in vertical position between two points A and B (see fig. 1). String is equipped with the attached inclination sensor, which generates changes of string inclination caused by mutual horizontal displacement of tie points. These changes are read on the voltmeter or recorded. Changes of string inclination are measured with the accuracy of $1.25 \times 10^{-5} = 8 \mu$, which means, that horizontal displacement of the end of string, 80 m in length, in relation to its second end can be determined with accuracy of 1 mm.

The device is designed for measuring horizontal displacements of buildings located on escarpments in landslide zones, as well as for determining changes of inclination of cavity walls, dams, high buildings, lift shafts, etc.

Translation: Zbigniew Bochenek

*ЕЖИ ЯНУШ
ВОЙЦЕХ ЯНУШ*

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЯГОВОГО
ИНКЛИНОМЕРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ СОСТОЯНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ПОСТРОЕК**

Р е з ю м е

В работе описан инклинометр, служащий для определения крена тяги (струны), растянутой в позиции приблизительно вертикальной между двумя пунктами А, В (см. рис. 1). На тяге закреплён вблизи одного конца сенсор крена, который генерирует изменения крена тяги, вызванные взаимным горизонтальным перемещением пунктов закрепления. Эти изменения считываются с вольтметра или регистрируются. Изменения крена тяги измеряются с точностью порядка $1,25 \times 10^{-5} = 8 \mu$, обозначает это, что горизонтальные сдвиги конца тяги длиной 80 м относительно её начала могут быть определены с точностью порядка 1 мм.

Прибор предназначен для измерения горизонтальных сдвигов построек, находящихся на террасах в оползневых зонах, а также для измерения изменений крена: щелевых стен, гидроплотин, высоких построек, лифтовых шахт.

Перевод: Роза Толстикова