

ANDRZEJ KULICZKOWSKI¹
AGATA ZWIERZCHOWSKA²

Kielce University of Technology
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce, Poland

¹ e-mail: akulicz@tu.kielce.pl

² e-mail: agataz@tu.kielce.pl

THE OPTIMIZATION OF TRENCHLESS PIPE LAYING TECHNOLOGIES AND THE SPECIFICITY OF PIPE LAYING IN URBAN CONDITIONS

Abstract

Three mathematical models AZ – 01, AZ – 02 and AZ – 05 are presented. The first one (AZ – 01) refers to optimum trenchless pipe laying technology and specified input data. Given are: the classification of trenchless methods, assumptions, limiting conditions, input and output quantities. The algorithm of the model is discussed. The second one (AZ – 02) refers to the choice of optimum trenchless technologies taking into account the specificity of urban conditions. The assumptions, limiting conditions of this model such as the rate of work, the dimensions of starting and target pits are given. The third one (AZ – 05) reckons the costs of diversions for linear objects. The results of analysis carried out in Wrocław (Poland) and Leipzig (Germany) using the AZ – 05 model has been shown.

Keywords: mathematical models, trenchless pipe laying technology

1. Introduction

In Poland there is no scientific descriptions or instructions for the optimum choice of trenchless pipe laying technologies. Therefore there is the need to elaborate the mathematical model AZ – 01 for the choice of the optimum method for trenchless pipe laying and mathematical model AZ – 02 taking into account the specificity of pipe laying in urban conditions. The selection process for trenchless pipe laying methods is complex. For the optimum trenchless technology the combinations of the variety of factors by the choice of the parameters should be considered. These are: the materials and the geotechnical aspects.

2. The mathematical model AZ – 01 of the optimum choice for pipe laying trenchless methods

2.1. Introduction

Each trenchless pipe laying method is characterized by technical parameters such as: nominal inside diameters of installed pipes; the material of installed pipes; driving distances; soil type, in which there is the possibility of installing a pipeline using given method; accuracy; the depth of cover and others. These parameters varies for different methods. The parameters such as the type of soil or the ground water

level can exclude the possibility of using a given method for given pipe laying task. Therefore the choice of optimum trenchless pipe laying method is the main aim of elaborated model AZ – 01.

2.2. The division of trenchless pipe laying methods applied in the model

There are many divisions and classifications for trenchless pipe laying technologies (methods). In AZ – 01 model our own division was applied. Twelve methods have been analyzed. These are:

- Impact Molding
- Impact Ramming with Closed Pipe
- Soil Displacement Pipe Jacking
- Directional Drilling and Guided Boring
- Impact Ramming with Open Pipe
- Nonsteerable Pipe Jacking
- Steerable Pipe Jacking
- Pilot Boring with soil removal by screw conveyor
- Pilot Boring with hydraulic conveying of spoil
- Microtunnelling with soil removal by screw conveyor
- Microtunnelling with hydraulic conveying of spoil
- Microtunnelling with pneumatic conveying of spoil

Some methods, for example Pilot Boring is divided into two, considering the type of soil removal. The method with soil removal by screw conveyer and the method with hydraulic conveying of spoil are characterized by different values of technical parameters. This division doesn't comprise the methods which belong to tunnelling group.

2.3. Assumptions and limiting conditions

The following assumptions have been made:

- a man presence is not required and necessary in the pipeline during its construction in none of the methods;
- the designed pipeline consists of j – sections, each of them is contained between a starting pit and a target pit;
- the diameter of the pipeline and the thickness of the pipe is constant along the section;
- all sections of pipeline are built with one method;
- for the sections of pipeline for which technical parameters are considerably different it's possible to build this section with different method;
- all the pipeline consisting of j – sections comprises only one kind of pipeline;
- the following kinds of pipelines have been distinguished: pressure pipelines, gravity pipelines, pressure house connections, house sewers;
- there have been excluded: long – distance heating and refrigerating lines;
- seven types of soil have been considered [2];
- the model has been elaborated for the pipeline of circular cross section, the maximum depth of laying is 40 m and the nominal inside diameter ranges from 25 mm to 3 600 mm.

In model AZ – 01 the limiting conditions are: maximum driving distances for each method; the range of nominal inside diameters of installed pipes; the material of installed pipes; soil type for each method; the horizontal and the vertical accuracy of installed pipeline; the minimum depth of cover above the crown of the pipeline; the maximum level of ground water level above the pipeline bottom and others. All of the limiting conditions have been recorded in the form of matrices. For instance the limiting condition referring to the soil type, in which there is the possibility of installing a pipeline using given method has been recorded in a matrix form (1):

$$\mathbf{B} = [b_{ik}]_{m \times n} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m; \quad \text{where } m = 12 \quad (1)$$

$$k = 1, 2, \dots, n; \quad \text{where } n = 7$$

\mathbf{B} – the matrix which specifies the possibility of building the pipeline using i – method in k – soil type,

k – soil type, according [2],

i – trenchless pipe laying method, values from the set $\{0,1\}$ have been attributed to the matrix elements b_{ik}

where:

$b_{ik} = 1$ it specifies that there is the possibility of building the given pipeline using,

i – method in k – soil type,

$b_{ik} = 0$ it specifies that there is not the possibility of building the given pipeline using

i – method in k – soil type.

Other limiting condition refer to accuracy in vertical and horizontal direction of pipe installation. The highest demands are for gravity sewers. Therefore for constructing the gravity sewers only steerable methods are used. Non steerable methods can be used only for LAYING OUT other types of pipelines, where high accuracy is not required. The non steerable methods can be employed also for constructing house connections of gravity sewers of diameter DN 150 mm and of length not exceeding 20 m. The required gradient is 2% (min 1%). It can be assured with the non steerable methods.

In urban conditions, where the underground infrastructure is congested, the high accuracy of pipe laying is important. As there is a possibility of the collision with the existing pipelines.

The limiting condition referring to the accuracy in vertical and horizontal direction of installed pipeline has been recorded in matrices (2), (3):

$$\mathbf{G}^1 = [g^1_i]_{m \times l} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m; \quad \text{where } m = 12 \quad (2)$$

$$\mathbf{G}^2 = [g^2_i]_{m \times l} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m; \quad \text{where } m = 12 \quad (3)$$

\mathbf{G}^1 – the matrix specifying the accuracy of installed pipeline in vertical directions (in level), which i - method ensures [mm],

\mathbf{G}^2 – the matrix specifying the accuracy of installed pipeline in horizontal direction (in line), which i - method ensures [mm],

i – trenchless pipe laying method.

The requirements for maximum deviations in both: horizontal and vertical directions (according [1]), are shown in Table 1.

Table 1. The maximum deviations in vertical and horizontal direction for drains and sewers built by trenchless methods [1].

Nominal diameter, DN, [mm]	Maximum deviation in vertical direction, [mm]	Maximum deviation in horizontal direction, [mm]
DN < 600	± 20	± 25
600 ≤ DN ≤ 1000	± 25	± 40
1000 < DN < 1400	± 30	± 100
DN ≥ 1400	± 50	± 200

2.3. Input quantities, algorithm and output quantities

In the AZ – 01 model the following input quantities are considered: pipeline diameters, driving lengths, mean depth of laying for each section, the minimum depth above the crown of the pipeline; the type of pipeline, the material its made of, soil types for each section and other parameters, coefficients and auxiliary data. These quantities have been recorded as scalars, vectors and matrices, for instance:

$\mathbf{b}_j = [b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jk}, \dots, b_{jn}]$ – the vector specifying soil types, according [2], occurring in j – section of the designed pipeline, where $k = 1, 2, \dots, n$; $n = 7$

values from the set {0,1} have been attributed to the elements b_{jk} where:

$b_{jk} = 1$ it specifies that k – soil type occurs in j – section of the pipeline,

$b_{jk} = 0$ it specifies that k – soil type doesn't occur in j – section of the pipeline.

The algorithm comprises eleven steps. Considering the limited length of this PAPER pt only two steps, connected with presented limiting conditions, will be discussed.

The choice of method considering the soil types is one of the first steps in the algorithm. It is carried out by the choice of these vectors \mathbf{b}_i , which are i – rows of the matrix B. The vectors have to fulfil the condition (4):

$$\text{if } b_{jk} = 1 \text{ then } b_{ik} = 1 \tag{4}$$

where b_{jk} are the elements of the vector \mathbf{b}_j

The following step in the algorithm is the choice of a method considering the required accuracy of pipe installation. It refers only to gravity pipelines.

First, the smallest diameter of the designed pipeline is chosen. The smaller the diameter, the higher is the accuracy; and, consequently, the smaller is the deviation. The assumption was made, that the pipeline length will be layed with one method. So the accuracy of the smallest diameter will determine the choice of method to be applied.

Then g^1_i are chosen, fulfilling the inequality (5):

$$g^1 \geq g^1_i \tag{5}$$

for the accuracy in vertical direction

and then

g^2_i are chosen, fulfilling the inequality (6):

$$g^2 \geq g^2_i \tag{6}$$

for the accuracy in horizontal direction

where: g^1, g^2 – required accuracy in vertical and in horizontal directions respectively g^1_i, g^2_i – the elements of the matrices G^1, G^2 – specifying the accuracy of pipe installation in vertical and horizontal direction respectively, for each i – method [mm].

The index or indexes which identifies a method or some methods of trenchless pipe laying is the output quantity.

3. The mathematical model AZ – 02 of the choice of optimum trenchless pipe laying methods with regard to specificity of urban conditions

3.1. Introduction

The mathematical model AZ – 01 enables the choice of optimum trenchless pipe laying method generally for technical criterion. Whereas the pipe laying in urban conditions creates additional restrictions and requirements. This fact inclined the authors of the paper to elaboration a mathematical model AZ – 02. The model will enable the choice of optimum trenchless pipe laying method with regard to the specificity of pipe laying in urban conditions. The rate of work, the dimensions of starting and target pits, the dimensions of building site are the important factors which influences the pipe laying in city centres using trenchless methods.

3.2. Assumptions and limiting conditions

In the model AZ – 02 the constrains related to the rate of work, the shape of starting and target pits, type of pit sheeting have been selected. In the model there have been qualified the following limiting conditions referring to the rate of pipe laying, the minimum dimensions of starting and target pits, the minimum dimensions of building site and others. Each limiting condition has been recorded in the model as a matrix.

For instance the limiting condition relating to the rate of work has been recorded in a matrix form (7):

$$S = [s_{ik}]_{m \times n} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m; \quad \text{where } m = 12, \quad (7) \\ k = 1, 2, \dots, n, \quad \text{where } n = 7,$$

S – the matrix of work rate for i – method depending of k – soil type,

s_{ik} – the rate of work for i – method and k – soil type, [m/h],

k – soil type,

i – trenchless pipe laying method.

4. The costs of traffic diversions

4.1. Introduction

The models AZ – 01 and AZ – 02 choose the optimum method from among the trenchless. In many cases, the choice between the trenchless and the open trench method is an important problem. The model KA – 05 elaborated earlier, could be useful.

Trenchless methods are viewed {considered} as more expensive then the traditional ones. It's true, but only in the case of pipe laying on uninvested areas and for small depths. To compare the costs of pipe laying with both methods one regard {consider} all the costs, i.e. direct and indirect costs. Among the indirect costs there are the costs of traffic detours {re-routing}. During trenchless pipe laying these costs are considerably reduced or don't occur at all.

The elongation of vehicle routes as consequence of traffic diversions causes additional expenses which should be considered. These are: an increase in operating costs of vehicles, driver's and passenger's delays, and the higher number of accidents. Based on given data, the analyses of operating costs have been made. They comprise the costs of fuel, tyre, oils and lubricants, as well as operating repairs and amortization. The unit costs of the loss of passenger's time for different municipal transport services have been ascertained. Also, the cost caused by the accidents were taken in the account.

4.2. The mathematical model KA – 05 reckoning the cost of traffic diversions in urban conditions

The model reckons the twenty – four hours traffic diversions. The route of diversion has been divided on k – sections. Each section differ by the technology of pipe lying, each of k – section includes b – sections, which differ with respect to the magnitude of diversion. The costs of diversions are calculated separately for i – traffic directions ($i=1$ or $i=2$) for each type of vehicle (cars, lorries, busses). Next they are summed up. The costs of diversions are reckoned as a sum of:

- operational costs increase (the product of the vehicle rout extension, the vehicle operational cost and number of each type of vehicles);
- the incur costs as onsequence of passenger's time loss (the product of cost of lost hour and the type of vehicle, the difference in time between covering the road with the diversion and without the diversion multiplied by the number of vehicles of each type);
- the costs incurred as the consequence of the losses from an increase of the number of accidents.

The costs of accidents are calculated as a product of the accident number and the cost of one accident. The number of accidents is then the product of the accident coefficient, the length of the route and the traffic intensity. The costs connected with the increase of number of accidents are calculated as a difference between the cost of accidents on the diversion route and on the route without the diversion for each type of vehicles separately.

The KA – 05 program calculates the real speed of vehicles on the diversion and on the closed roads. These are different for different types of the vehicles. The speed depends on the technical state of pavement and the traffic intensity.

The program KA – 05 was applied for the calculation of the diversion costs in the city centre of Wroclaw for chosen roads. The calculations showed. that these costs are very high as compared to direct costs of most engineering objects, built in road lanes. For instance for intercepting sewer in nominal diameter of 1.8 m and built at the depth of 5 m (in open trench method), assuming the 200 meter long building section and the work rate of 5 meters per day, the road will be closed for 80 days. It almost doubles the cost of the sewer building.

Table 2. The structure of costs for different ways of construction

Way of building	Costs [%]		
	of building	of diversions	of supplying
trenches with sloped sides	30 – 40	50 – 60	5 – 10
trenches witch vertical sides	20 – 30	60 – 70	5 – 10
trenchless method (pipe jacking)	100	–	–

At the Technical University in Leipzig some corrections were made in the program KA – 05, referring mainly to the values of unit costs.

The results pertained to costs for nonsheeting trenches with sloped sides, sheeting trenches with vertical sides and for trenchless method – pipe jacking have been given in Table 2.

The economic indexes in Germany were comparable with the results obtained in Poland. They prove (Table 2, Table 3 and Fig. 1) that the costs of diversions in city centres are high. In case of intercepting sewers they are twice the CONSTRUCTION costs.

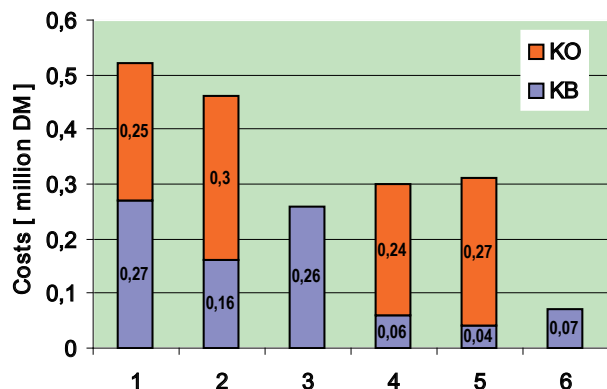


Fig. 1. The structure of costs based on studies carried out in Technical University in Leipzig for the crossroad of two roads and tram – way along one of them

Notations: KB – building costs, KO – the costs of diversion including, K1 – operating costs of vehicles, K2 – the costs of changes in municipal transport services, K3 – the costs of accidents and changes in traffic organization, K4 – the costs of driver’s and passenger’s delays; 1 – open trench $\alpha = 60^\circ$, 2 – open trench $\alpha = 90^\circ$, 3 – pipe jacking, 4 – open trench $\alpha = 60^\circ$, 5 – open trench $\alpha = 90^\circ$, 6 – pipe jacking; 1, 2, 3 for lengthwise direction and 4, 5, 6 for crosswise direction.

Table 3. The costs based on studies carried out in Technical University in Leipzig for the crossroad of two roads and tram – way along one of them

	The structure of costs [%]					
	1	2	3	4	5	6
KB	51	36	100	22	13	100
KO	49	64	–	78	87	–
K1	23	31	–	19	21	–
K2	–	–	–	21	23	–
K3	2	2	–	2	2	–
K4	24	31	–	36	41	–

Notations the same as in Figure 1.

The graph in Figure 1 and Table 3 show the costs for a crossroad in the city of Leipzig. The calculations

were made for three ways of building the intercepting sewer which diameter was 1.0 m.

5. Conclusions

1. The results obtained for economic indexes in Germany and the results obtained in Poland are similar. They confirm, that costs of diversions in city centres are high and in case of intercepting sewers they are two times higher then the building costs.
2. The model AZ – 01 enables the choice of optimum trenchless pipe laying method but there is the well – founded need of connecting both models AZ – 01 and KA – 05.
3. There is also the need of developing the model KA – 05 taking into account the aspects of private property and environment protection.

References

- [1] ATV A 125 – Pipe Driving.
- [2] DIN 18 300 – VOB *Tendering Rules for Construction Work*, General Technical provisions for Earthworks.
- [3] Kuliczkowski A.: *Możliwości optymalizacji przebudowy magistralnej sieci kanalizacyjnej na przykładzie lewobrzeżnego Wrocławia*, Praca doktorska, Instytut Inżynierii Łądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1978.
- [4] Kuliczkowski A.: *Kryteria wyboru metody bezodkrywkowej dla kanałów budowanych w warunkach miejskich*, *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 11, s. 323-327, 1979.
- [5] Kuliczkowski A.: *Koszty objazdów a tempo budowy obiektów inżynierskich w warunkach miejskich*, *Zeszyty naukowe Politechniki Świętokrzyskiej*, *Budownictwo* 24, Kielce 1987.
- [6] Kuliczkowski A., Zwierzchowska A.: *Wybrane problemy optymalnego doboru metod bezwykopowej budowy rurociągów podziemnych*, *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Łądowej Politechniki Wrocławskiej* nr 48, s. 182-189, Wrocław 1999.
- [7] Kuliczkowski A., Zwierzchowska A.: *Koncepcja optymalnego doboru metod bezwykopowej budowy rurociągów podziemnych*, *Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe* nr 2, 2000.
- [8] Kuliczkowski A., Zwierzchowska A.: *Kryteria doboru metod bezwykopowej budowy rurociągów*, II Konferencja naukowo-techniczna: Nowe materiały i urządzenia w wodociągach i kanalizacji, s. 131-137, Kielce 2001.
- [9] Zwierzchowska A.: *Optymalizacja doboru metod bezwykopowej budowy rurociągów podziemnych*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej nr 38, Kielce 2003, s. 163.
- [10] *Technologie bezwykopowe w Inżynierii Środowiska*. Praca zbiorowa pod redakcją prof. Andrzeja Kuliczkowskiego. Wydawnictwo Seidel-Przywecki 2010, s. 735.

Andrzej Kuliczkowski
Agata Zwierzchowska

Optymalizacja doboru bezwykopowych technologii budowy przewodów podziemnych a specyfika warunków miejskich

1. Wstęp

Optymalizacja doboru bezwykopowych technologii budowy przewodów podziemnych to zagadnienie interdyscyplinarne, obejmujące problemy, między innymi z materiałoznawstwa, geotechniki, mechaniki płynów oraz aspekty ekonomiczne i ochrony środowiska. Dlatego też aby wybrać optymalną technologię bezwykopowej budowy dla określonego zadania należy przeanalizować wiele czynników oraz parametrów technicznych. W Polsce nie istniały jakiegokolwiek opracowania ani wytyczne służące optymalnemu doborowi tychże metod. Fakt ten skłonił autorów referatu do opracowania modelu matematycznego AZ – 01 optymalnego doboru metod bezwykopowej budowy przewodów podziemnych oraz modelu AZ – 02 uwzględniającego specyfikę warunków miejskich.

2. Model matematyczny AZ – 01 optymalnego doboru metod bezwykopowej budowy przewodów podziemnych

Każda z metod bezwykopowej budowy rurociągów podziemnych scharakteryzowana jest poprzez parametry techniczne, np.: typowe średnice, materiał wbudowywanych rur, typowe długości wykonywanych jednorazowo rurociągów, rodzaj gruntu, w którym możliwa jest budowa daną metodą, dokładność wykonania i inne. Parametry te mogą przyjmować różne wartości dla różnych metod. Niektóre czynniki takie jak rodzaj gruntu, poziom wody gruntowej itp., mogą eliminować wykonanie rurociągu daną metodą, np. nie jest możliwe wykonanie rurociągu metodą przecisku przebijakiem pneumatycznym w gruncie nawodnionym. Toteż zasadniczym celem opracowanego modelu AZ – 01 jest dobór metod bezwykopowej budowy ze względu na możliwości techniczne wbudowania danego przewodu przy zadanych wielkościach wejściowych.

Istotnym zagadnieniem w opracowanym modelu było przyjęcie podziału metod bezwykopowej budo-

wy przewodów podziemnych, ponieważ istnieje wiele różnych podziałów i klasyfikacji. W opracowanym modelu AZ – 01 przyjęto własny, szczegółowy podział, a analizie technicznej poddano następujące metody:

- przecisk poprzez zagęszczanie gruntu przebijakiem pneumatycznym tzw. kretem,
- przecisk poprzez zagęszczanie gruntu rurą z zakończeniem stożkowym,
- przecisk hydrauliczny poprzez zagęszczanie gruntu,
- wiercenie kierunkowe i przewiert sterowany,
- pneumatyczne wbijanie rur stalowych,
- przecisk hydrauliczny niesterowany z transportem urobku przenośnikiem ślimakowym,
- przecisk hydrauliczny sterowany z transportem urobku przenośnikiem ślimakowym,
- przecisk hydrauliczny z wierceniem pilotowym oraz z transportem urobku przenośnikiem ślimakowym,
- przecisk hydrauliczny z wierceniem pilotowym i płuczkowym transportem urobku,
- mikrotunelowanie z transportem urobku przenośnikiem ślimakowym,
- mikrotunelowanie z płuczkowym transportem urobku,
- mikrotunelowanie z pneumatycznym transportem urobku.

Podział przyjęty w modelu obejmuje tylko te metody, które nie wymagają pracy człowieka w wykonywanym rurociągu, nie zawiera on zatem metod należących do grupy tunelowania.

Jednym z pierwszych etapów tworzenia modelu było sformułowanie założeń i warunków ograniczających. W modelu przyjęto następujące założenia:

- żadna z metod nie wymaga obecności człowieka w rurociągu w trakcie jego budowy;
- projektowany rurociąg składa się z j – odcinków, zawartych między wykopem początkowym a docelowym oraz nie występuje zmiana średnicy i grubości ścian rurociągu w obrębie danego odcinka;

- cały projektowany rurociąg wykonuje się jedną metodą, ale dla odcinków o parametrach znacznie odbiegających od pozostałych dopuszcza się możliwość wykonania danego odcinka inną metodą;
- cały rurociąg składający się z j – odcinków obejmuje jeden rodzaj sieci;
- wyróżniono następujące rodzaje sieci:
 - rurociągi ciśnieniowe,
 - rurociągi grawitacyjne,
 - przyłącza ciśnieniowe,
 - przyłącza grawitacyjne;
- nie uwzględniono rurociągów ciepłowniczych;
- założono 7 rodzajów gruntu;
- model opracowano dla przekroju poprzecznego kołowego rurociągu, maksymalnej głębokości ułożenia 40 m i średnic rurociągów od 25 mm do 3600 mm.

W modelu AZ – 01 przyjęto warunki ograniczające dotyczące: maksymalnej możliwej długości wykonywanego odcinka dla danej metody; zakresu możliwych do wykonania średnic rurociągu; rodzaju gruntu, w którym możliwa jest budowa daną metodą; nawodnienia gruntu; materiału rurociągu; dokładności wykonania w pionie i w poziomie; minimalnej wysokości nadsypki nad wierzchołkiem rurociągu oraz maksymalnej wysokości zwierciadła wody gruntowej ponad rzędną dna rurociągu. Poszczególne warunki ograniczające zostały zapisane w modelu w postaci macierzy. Przykładowo warunek ograniczający dotyczący rodzaju gruntu, w którym możliwe jest wykonanie rurociągu daną metodą bezwykopową zapisano w postaci:

$$B = [b_{ik}]_{m \times n} \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, m; \quad \text{gdzie } m = 12 \\ k = 1, 2, \dots, n; \quad \text{gdzie } n = 7$$

B – macierz określająca możliwość wykonania rurociągu daną i – tą metodą w k – tym rodzaju gruntu, k – rodzaj gruntu, wg [2],

i – kolejna metoda bezwykopowej budowy rurociągów podziemnych,

elementom b_{ik} przypisano wartości $\{0,1\}$

gdzie:

$b_{ik} = 1$ określa możliwość wykonania rurociągu daną i – tą metodą w k – tym rodzaju gruntu,

$b_{ik} = 0$ określa brak możliwości wykonania rurociągu daną i – tą metodą w k – tym rodzaju gruntu,

W opracowanym modelu AZ – 01 przyjęto między innymi następujące wielkości wejściowe: średnicę rurociągu, długości wykonywanych odcinków, średnią głębokość ułożenia dla danego odcinka, minimalną projektowaną wysokość nadsypki nad wierzchoł-

kiem rurociągu, rodzaj sieci, materiał rurociągu, rodzaj gruntu dla poszczególnych odcinków oraz inne wskaźniki i dane pomocnicze. Wielkości te zapisano jako skalary, wektory lub macierze, np.:

$b_j = [b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jk}, \dots, b_{jn}]$ – wektor określający rodzaje gruntu, występujące w j -tym odcinku rozpatrywanego rurociągu, zawartym pomiędzy wykopem początkowym a docelowym, gdzie $k = 1, 2, \dots, n$, $n = 7$;

elementom b_k przypisano wartości $\{0,1\}$, gdzie:

$b_{jk} = 1$ określa, że dany k – ty rodzaj gruntu występuje w j -tym odcinku rozpatrywanego rurociągu;

$b_{jk} = 0$ określa, że dany k – ty rodzaj gruntu nie występuje w j – tym odcinku rozpatrywanego rurociągu;

Algorytm przyjęty w modelu teoretycznym obejmuje 11 kroków. Ze względu na ograniczoną objętość publikacji omówiony zostanie krok, związany z podanym wcześniej warunkiem ograniczającym.

Jest on realizowany poprzez wybór tych wektorów b_j , będących i – tymi wierszami macierzy B takich, że:

$$\text{jeśli } b_{jk} = 1 \quad \text{to } b_{ik} = 1$$

gdzie b_{jk} elementy wektora b_j

3. Model matematyczny AZ – 02 doboru optymalnej metody bezwykopowej budowy przewodów podziemnych z uwzględnieniem specyfiki warunków miejskich

Model matematyczny AZ – 01 dobiera optymalną metodę bezwykopowej budowy przewodów podziemnych ogólnie dla kryterium technicznego. Natomiast budowa rurociągu metodą bezwykopową w warunkach miejskich stwarza dodatkowe wymagania i ograniczenia. W tym celu opracowany został model matematyczny AZ – 02, który umożliwia dobór optymalnej metody bezwykopowej z uwzględnieniem specyfiki warunków miejskich. Tempo robót, minimalne wymiary wykopu początkowego i docelowego dla danej metody, minimalne wymiary placu budowy są istotnymi czynnikami mającymi wpływ na prowadzenie prac w warunkach miejskich przy zastosowaniu metod bezwykopowej budowy rurociągów podziemnych.

4. Koszty objazdów w warunkach miejskich

Powszechnie istnieje pogląd, że bezwykopowe metody wykonania przewodów podziemnych są drogie, w wielu przypadkach droższe niż metody wykopowe. Bez wątpienia jest to prawda, ale tylko w przypadku budowy przewodów podziemnych na terenach niez-

inwestowanych i przy niewielkich głębokościach ułożenia. Aby móc określić koszty wykonania przewodu metodą bezwykopową i wykopową należy wziąć pod uwagę wszystkie rodzaje kosztów występujące podczas budowy oraz po jej zakończeniu, a mianowicie koszty bezpośrednie i koszty pośrednie. Wśród kosztów pośrednich można wyróżnić koszty wynikłe z wprowadzenia objazdów na czas budowy rurociągu metodą wykopową, szczególnie w warunkach miejskich. Koszty wynikłe z wprowadzenia objazdów w czasie budowy przewodu metodą bezwykopową są znacznie ograniczone. W większości przypadków nie występują, gdyż nie stosuje się objazdów a tylko niewielkie zmiany w organizacji ruchu, wiążące się najczęściej z ograniczeniem prędkości w obrębie wykopu początkowego i docelowego.

Wydłużenie drogi przejazdu wskutek utworzenia objazdu powoduje wzrost kosztów eksploatacyjnych pojazdów, straty czasu przez pasażerów, wzrost kosztów związanych ze zwiększeniem się liczby wypadków oraz wzrost kosztów eksploatacyjnych i czasu przejazdu w wyniku powstania utrudnień na trasie objazdu. Utrudnione są także dostawy do sklepów, dojazdy do domów, często wydłuża się droga pieszych. W oparciu o uzyskane dane przeprowadzono analizę kosztów eksploatacyjnych pojazdów, obejmującą koszty paliwa, ogumienia, olejów i smarów, remontów eksploatacyjnych oraz amortyzacji. Ustalono także jednostkowe koszty straty czasu przez pasażerów w komunikacji miejskiej dla różnych środków transportu oraz oszacowano koszty wypadków.