

## ВИРТУАЛЬНОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ПРОЕКТИРУЕМОГО ПРОТЯЖЕННОГО ТРУБОПРОВОДА, ВСТРАИВАЕМОГО В СЕТЬ ГОРОДСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

А.К. БУЗДОВ, А.С. ТИТОВ

Институт информатики и проблем регионального управления –  
филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр  
«Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»  
360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а  
E-mail: iipru@rambler.ru

*Одной из основных проблем водоснабжения городов является проектирование новых протяженных трубопроводов (ПТ), встраиваемых в существующую сеть городского водоснабжения. Проблема возникла из-за старения существующих сетей, встраивания в городскую среду значительного количества новых многоквартирных домов и связанной с этим невозможности обеспечения потребителей нормированным количеством воды по существующей сети. При этом значительную часть времени занимает проектирование трассы трубопровода и определение ее параметров. В работе представлены укрупненный алгоритм и основные фрагменты разработанной программной системы автоматизированного проектирования ПТ, интегрированной в среду Unity3D с целью предоставления проектным организациям средств визуализации трассы ПТ, ее параметров и оптимизации ПТ. Ее применение обеспечит значительное сокращение времени проектирования и оптимизации ПТ.*

**Ключевые слова:** система водоснабжения, протяженный трубопровод, автоматизированное проектирование, визуализация трассы ПТ, оптимизация трубопровода.

### 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время остро стоит проблема обеспечения надежного функционирования сети водоснабжения городов.

Проблема возникла по следующим причинам:

– старение существующих сетей, приводящее к частым авариям в сети и отключению воды в различных районах и микрорайонах города. Существующий подход, состоящий в локальном ремонте, не решает проблему;

– встраивание в существующую городскую среду значительного количества новых многоквартирных домов и связанная с этим невозможность обеспечения потребителей нормированным количеством воды по существующей сети. В настоящее время проблема решается путем назначения графика подачи воды к группам домов.

Проблема может быть решена только существенным обновлением сети городского водоснабжения. Оптимальным подходом при этом является встраивание в существующую сеть новых протяженных трубопроводов (ПТ), обеспечивающих подачу нормированного количества воды по обновленной сети.

При проектировании ПТ, встраиваемых в сеть городского водоснабжения, значительная доля времени затрачивается на прокладку трассы ПТ и определение ее параметров – длин участков трубопровода, высотных отметок контрольных точек.

В представляемой программной системе существенное сокращение времени прокладки трассы и определение ее параметров осуществляется на основе спутниковых снимков и цифровой модели поверхности земли SRTM. Проектирование, визуализация, расчеты и оптимизация параметров ПТ выполняются в среде Unity3D. Отметим, что существующие технологии трехмерного проектирования не предоставляют возможности автоматической оптимизации ПТ и его параметров.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПТ

Для понимания проблемы рассмотрим вначале задачу оптимального проектирования ПТ.

Затраты на строительство и эксплуатацию ПТ не соответствуют, как правило, запланированным, на основе которых и выбираются параметры трубопровода. Вследствие этого следует исходить из многолетней практики строительства и эксплуатации трубопроводов [1, с. 34-35, 47-48, 54-55]. Нашей целью является соединение этого подхода с оптимизацией при учете заданных объективных данных. Такими данными являются напор и высотная отметка начала и конца трубопровода, длины участков ПТ, величины потоков по участкам ПТ.

Удельная стоимость  $i$ -го участка ПТ может быть выражена эмпирической формулой [1, 2]

$$c_i = a + bd_i^\alpha, \quad (1)$$

где  $a, b, \alpha$  – числовые коэффициенты;  $a > 0, b > 0, 1 < \alpha \leq 2, d_i$  – диаметр труб на  $i$ -м участке трубопровода. Однако формула (1) неудобна для использования методов оптимизации, так как в постановках задач оптимального проектирования сетей ограничения представляют собой уравнения неразрывности и потенциальности потока (аналоги уравнений Кирхгофа для электрических сетей). Поэтому, пользуясь известными формулами гидравлики [1] типа Дарси-Вейсбаха для удельных потерь напора  $h_i$  при движении потока  $q_i$  по трубе диаметром  $d_i$

$$h_i = \frac{kq_i^\beta}{d_i^\gamma}, \quad \beta > 1, \quad \gamma > 4, \quad (2)$$

получим

$$c_i = a + b \left( \frac{q_i^\beta}{h_i} \right)^{\frac{\alpha}{\gamma}}$$

Тогда целевая функция задачи проектирования ПТ примет вид:

$$Z = \sum_{i=1}^n \left[ a + bk^{\frac{\alpha}{\gamma}} q_i^{\frac{\beta\alpha}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}} \right] l_i \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $l_i, q_i, h_i, i = \overline{1, n}$  – заданные длины участков ПТ, заданные величины потоков по участкам ПТ, искомые удельные потери напора по участкам ПТ.

В постановку задачи включим замыкающее соотношение, связывающее важнейшие индивидуальные характеристики проектируемого ПТ, по которым определяются энергетические затраты на транспорт воды по ПТ:

$$\sum_{i=1}^n h_i l_i = H_0 + z_0 - H_n - z_n, \quad (4)$$

где  $H_0, z_0; H_n, z_n$  – соответственно заданные напор воды и высотная отметка в начале и в конце ПТ.

Поскольку в (4)  $\sum_{i=1}^n a l_i = \text{const}, bk^{\frac{\alpha}{\gamma}}$  – числовой коэффициент, то задача (3)-(4) эквивалентна задаче

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n q_i^{\frac{\beta\alpha}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}} l_i \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^n h_i l_i = P_{0n}, \quad \text{где } P_{0n} = H_0 + z_0 - H_n - z_n \end{array} \right. \quad (5)$$

$$(6)$$

В задаче (5), (6) следует определить  $h_i, i = \overline{1, n}$ .

Эта задача была поставлена и решена в [3].

Представим здесь последовательность основных этапов оптимизации трубопровода:

- определяются оптимальные идеальные (т.е. в непрерывной шкале) диаметры труб по участкам ПТ;
- осуществляется переход с идеальных диаметров на заданный дискретный сортамент труб на каждом участке ПТ;
- решается проблема телескопичности, т.е. трубопровод формируется так, что диаметры труб от его начала к концу ни на одном последующем участке не превышают диаметра труб на предыдущем.

### III. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРАССЫ ПТ

Представляемое решение состоит в использовании компьютерного проектирования надежного магистрального трубопровода с использованием метода его автоматической оптимизации и трехмерного прототипирования на основе спутниковых снимков и цифровой модели высот Земли SRTM. Проектирование, визуализация, расчеты и оптимизация параметров ПТ выполняются в среде Unity3D.

**В разработанной программной системе имеются следующие элементы интерфейса:**

*а) Кнопки:*

- «Проложить линии трубопровода» – переводит программу в режим прокладывания трубопровода;
- «Добавить точку отвода воды» – добавляет точки отвода;
- «Продолжить линию трубопровода» – продолжает трубопровод из последней точки;
- «Инструкция для пользователя» – открывает окно с инструкцией по работе с программой;
- «Оптимизация» – запускает алгоритм для оптимизации трубопровода;
- «Заккрыть таблицу» – закрывает таблицу с результатами оптимизации.

*б) Поле для отображения текущего режима программы.*

*с) Поле для ввода расхода воды в точке отвода.*

Представим здесь основные этапы автоматизированного проектирования ПТ.

**1. В виртуальную среду загружается снимок участка карты города с помощью открытого сервиса просмотра карт OpenStreetMap и программы для работы с ландшафтами – SketchUp.**



**Рис. 1.** Загруженная карта части города, где будет проложен трубопровод

2. После загрузки карты **прокладываются линии трубопровода следующим образом:**

– Пользователь нажимает на кнопку «Проложить линии трубопровода», чтобы задать соответствующий режим работы программы. Текущий режим отображается на экране в соответствующем поле.

– Далее необходимо выбрать место на карте, из которого будет начинаться трубопровод, установить туда курсор мыши и нажать на левую кнопку мыши – будет добавлена первая точка.

– Далее пользователем устанавливается вторая точка и между ними автоматически прокладывается отрезок трассы трубопровода.

При последующем добавлении каждой новой точки к ней будет автоматически прокладываться следующий отрезок трассы, исходящий из предыдущей точки.

Ниже, на рис. 2 представлена сформированная трасса трубопровода и далее соответствующая часть программы, формирующая траекторию ПТ.



*Рис. 2. Проложенный трубопровод*

Используемый для этой операции код:

```
void AddNewDot() {
    RaycastHit hit;
    Ray ray = Camera.main.ScreenPointToRay(Input.mousePosition);
    if (Physics.Raycast(ray, out hit))
    {
        if (hit.transform.tag == groundTag)
        {
            if (path.Count < 2)
            {
                GameObject newSpDot = Instantiate(SpDot);
                Transform t = Instantiate(dotPrefab) as Transform;
                newSpDot.transform.position = hit.point + hit.normal * 0.15f;
                newSpDot.name = "dot " + (++dotsNumber);
                dots.Add(newSpDot);
                t.position = hit.point + hit.normal * 0.15f;
                t.rotation = Quaternion.FromToRotation(Vector3.up, hit.normal);
                path.Add(t);
            }
        }
    }
}

void AddNewPipe()
```

```

{
  if (path.Count == 2)
  {
    index = path.Count - 1;
    float dist = Vector3.Distance(path[index - 1].position, path[index].position);

    GameObject newObj = Instantiate(Obj);
    Vector3 MidHight = (path[index - 1].position + path[index].position) / 2;
    newObj.transform.position = MidHight;
    newObj.transform.localScale = new Vector3(newObj.transform.localScale.x,
    dist / 2, newObj.transform.localScale.z);
    newObj.transform.LookAt(path[index].position);
    newObj.transform.rotation *= Quaternion.Euler(0f, 90f, 90f);
    newObj.name = "pipe " + (dotsNumber - 1) + "_" + (dotsNumber);
    pipes.Add(newObj);
    Destroy(path[index-1].gameObject);
    lastDot = path[index];
    Destroy(path[index].gameObject);
    index = 0;
    path = new List<Transform>();
    Transform t = Instantiate(dotPrefab) as Transform;
    t.position = lastDot.position;
    t.rotation = lastDot.rotation;
    path.Add(t);
  }
}

```

**3. После прокладывания трассы трубопровода в нее встраиваются точки отвода воды.** Соответствующая процедура такова:

- Пользователь нажимает на кнопку «Добавить точку отвода воды» для перехода программы в соответствующий режим.
- Далее курсор мыши наводится пользователем на отрезок трассы и нажимается левая кнопка мыши, в результате чего добавляется точка отвода.
- После отображения добавленной точки отвода появляется поле для ввода расхода воды в данной точке.



**Рис. 3.** Трасса ПТ с отводами воды

Используемый для этой операции код:

```
void OnMouseDown()
{
    if (InterfaceControls.BranchPointAddingPermission == true)
    {
        if (AddPipe.path.Count != 1)
        {
            RaycastHit hit;
            Ray ray = Camera.main.ScreenPointToRay(Input.mousePosition);
            if (Physics.Raycast(ray, out hit))
            {
                GameObject newDDot = Instantiate(CDot);
                newDDot.transform.position = new Vector3(hit.point.x, hit.point.y-
0.49f, hit.point.z);
                string[] words = thisGObj.name.Split('_');
                int dotsNumber = System.Convert.ToInt32(words[1]);
                newDDot.name = "Ddot " + dotsNumber;
                auxVarFPoint = AddPipe.dots[dotsNumber-1];
                AddPipe.dots[dotsNumber - 1] = newDDot;
                if (AddPipe.dots.Count > 2)
                {
                    AddPipe.dots.Add(AddPipe.dots[AddPipe.dots.Count - 1]);
                    AddPipe.dots[AddPipe.dots.Count - 1].name = "dot " +
AddPipe.dots.Count;

                    for (int i = AddPipe.dots.Count - 2; i > dotsNumber; i--)
                    {
                        AddPipe.dots[i] = AddPipe.dots[i - 1];
                        words = AddPipe.dots[i].name.Split(' ');
                        if (words[0] == "dot")
                        {
                            AddPipe.dots[i].name = "dot " + (i + 1);
                        }
                        else
                        {
                            AddPipe.dots[i].name = "Ddot " + (i + 1);
                        }
                    }
                    AddPipe.dots[dotsNumber] = auxVarFPoint;
                    words = AddPipe.dots[dotsNumber].name.Split(' ');
                    if (words[0] == "dot")
                    {
                        AddPipe.dots[dotsNumber].name = "dot " + (dotsNumber + 1);
                    }
                    else
                    {
                        AddPipe.dots[dotsNumber].name = "Ddot " + (dotsNumber + 1);
                    }
                }
                else
                {
                    auxVarFPoint.name = "dot " + (dotsNumber + 1);
                    AddPipe.dots.Add(auxVarFPoint);
                }
                AddPipe.AddTwoNewPipes(newDDot, thisGObj);
            }
        }
    }
}
```

4. После ввода всех необходимых параметров запускается алгоритм оптимизации нажатием кнопки «Оптимизация». После расчета всех значений результаты выводятся в таблицу.

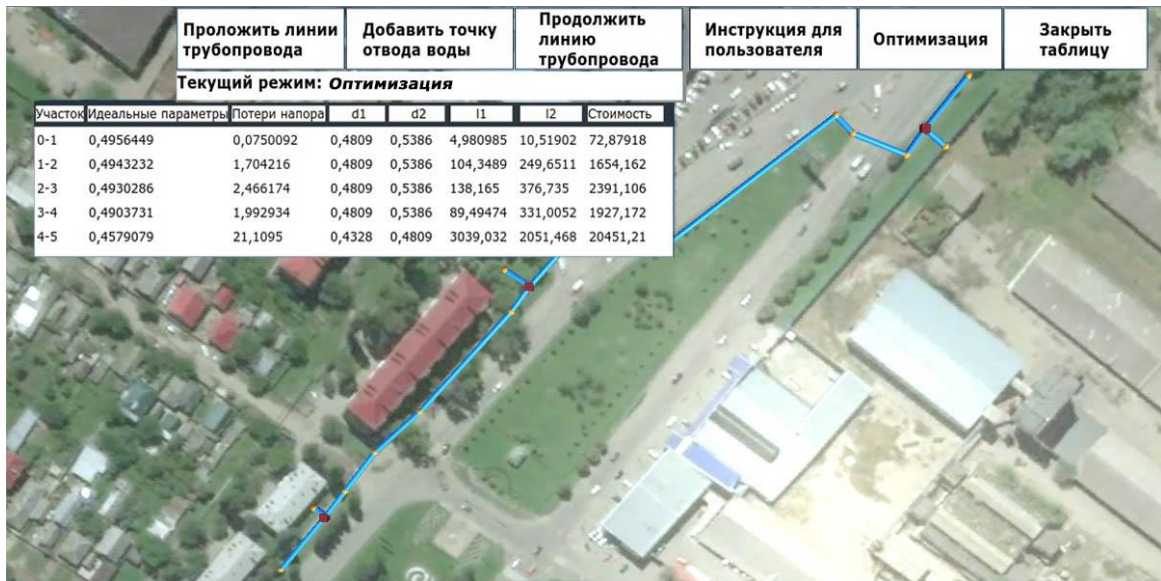


Рис. 4. Вывод основных результатов оптимизации ПТ в таблицу

Код, используемый для этой операции:

```
private void Ok_inputVal(object parameter)
{
    xaml = view.Xaml1;
    view.Xaml1 = xaml2;
    view.LoadXaml(true);
    view.Content.DataContext = this;
    OnNotifyMessage("Текущий режим: Оптимизация");
    PipelineLayingPermission = false;
    BranchPointAddingPermission = false;
    TableVis = "Visible";
    HideTableVis = "Visible";
    int n;
    int i, j;
    int[] k;
    float H0, z0, Hn, zn, P0n, alfa, beta, gamma, ka, S, ko;
    float[] l;
    float[] q;
    float[] D;
    float[] hiud;
    float[] H;
    float[] Hr;
    float[] z;
    z0 = (float)System.Convert.ToDouble(StartPres);
    zn = (float)System.Convert.ToDouble(EndPres);
    P0n = (H0 + z0 - (Hn + zn));
    S = 0;
    float lmt = 0;
    for (i = 0; i < n; i++)
    {
        S = S + (float)Math.Pow(q[i], (beta * alfa) / (alfa + gamma)) * l[i];
        lmt = lmt + l[i];
    }
    float Sh = 0;
    for (i = 0; i < n; i++)
```

```

{
    hiud[i] = (float)(P0n * Math.Pow(q[i], (beta * alfa) / (alfa + gamma)) / S /
1.15);
    D[i] = (float)(Math.Pow((1.15 * ka), (1 / gamma)) * Math.Pow(q[i], (beta /
(alfa + gamma))) / Math.Pow(P0n, (1 / gamma)) * Math.Pow(S, (1 / gamma)));
    H[i] = hiud[i] * l[i];
    Sh = Sh + H[i];
    Hr[i] = H0 + z0 - Sh - z[i];
}
float[];
float[] d1 = new float[n];
float[] d2 = new float[n];
int[] JId = new int[n];
for (i = 0; i < n; i++)
{
    for (j = 0; j < diameters.Length - 1; j++)
    {
        if ((diameters[j] <= D[i]) && (D[i] <= diameters[j + 1]))
        {
            d1[i] = diameters[j];
            d2[i] = diameters[j + 1];
            JId[i] = j;
        }
    }
}

float h1;
float h2;
float[] x1 = new float[n];
float[] x2 = new float[n];
float c1;
float c2;
float[] coast = new float[n];
float[] prices;
for (i = 0; i < n; i++)
{
    h1 = (float)(ka * Math.Pow(q[i], beta) / Math.Pow(d1[i], gamma));
    h2 = (float)(ka * Math.Pow(q[i], beta) / Math.Pow(d2[i], gamma));
    x1[i] = (H[i] - h1 * l[i]) / (h2 - h1);
    x2[i] = l[i] - x1[i];
    c1 = prices[JId[i]];
    c2 = prices[JId[i]+1];
    coast[i] = c2 * x1[i] + c1 * x2[i];
}
for (i = 0; i < n; i++)
{
    ListV_Values.Add(new ListViewClass { ListV_Section = ""+i+"-"+(i+1),
ListV_IdealParam = ""+D[i], ListV_PressRedu = ""+H[i], ListV_d1 = ""+ d1[i], ListV_d2 =
""+ d2[i], ListV_l1 = ""+x1[i], ListV_l2 = ""+x2[i], ListV_Cost = ""+coast[i]/1000});
}
}

```

Программная система протестирована на проектировании реального трубопровода к комплексной застройке 1-й очереди Северного жилого района г. Армавир, протяженность которого составляет 6395 м, в его расчете принимал участие один из авторов статьи [3].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программная система предназначена для проектных организаций, занимающихся проектированием ПТ. Ее применение обеспечит значительное сокращение времени проектирования и оптимизации ПТ.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов Н.Н. и др.* Расчет водопроводных сетей. М.: Стройиздат, 1983. С. 278.
2. *Меренков А.П. и др.* Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения. Новосибирск: ВО «Наука», 1992. С. 406.
3. *Кудаев В.Ч., Бuzдов А.К.* Математическое моделирование и компьютерное проектирование магистральных трубопроводов, встраиваемых в сеть городского водоснабжения // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 4(24). С. 109-116. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-24-4-109-116.

## REFERENCES

1. Abramov N.N. and others. *Raschet vodoprovodnykh setey* [Calculation of water supply networks]. M.: Stroyizdat, 1983. P. 278.
2. Merenkov A.P. and others. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya sistem teplo-, vodo-, nefte- i gazosnabzheniya* [Mathematical modeling and optimization of heat, water, oil and gas supply systems]. Novosibirsk: VO «Nauka», 1992. P. 406.
3. Kudaev V.Ch., Buzdov A.K. *Matematicheskoye modelirovaniye i komp'yuternoye proyektirovaniye magistral'nykh truboprovodov, vstraivayemykh v set' gorodskogo vodosnabzheniya* [Mathematical modeling and computer design of main pipelines embedded in the urban water supply network] // *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki* [KRAUNTS Herald. Phys.-mat. science]. 2018. No 4 (24). P. 109-116. DOI: 10.18454 / 2079-6641-2018-24-4-10-10-116

## VIRTUAL PROTOTYPING OF DESIGNED EXTENDED PIPELINE, INTEGRATED IN THE CITY WATER SUPPLY NETWORK

A.K. BUZDOV, A.S. TITOV

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –  
branch of Federal public budgetary scientific establishment "Federal scientific center  
"Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"  
360000, KBR, Nalchik, 37-a, I. Armand St.  
E-mail: iipru@rambler.ru

*One of the main problems of urban water supply is the design of new extended pipelines (EP), built into the existing urban water supply network. The problem arose due to the aging of existing networks and the incorporation into the existing urban environment of a significant number of new apartment buildings and the consequent impossibility of providing consumers with a normalized amount of water through the existing network. Moreover, a significant part of the design time is taken by the design of the pipeline route and the determination of its parameters. The paper presents an enlarged algorithm and the main fragments of the developed software for computer-aided design, integrated into the Unity3D environment in order to provide design organizations with tools for visualizing the EP route, its parameters, and optimizing the EP. Its application will provide a significant reduction in design time and optimization of EP.*

**Keywords:** water supply system, long pipeline, computer-aided design, visualization of the EP route, pipeline optimization.

*Работа поступила 08.07.2019 г.*