

УДК 532.542/.543

**СОВРЕМЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В  
МОДЕЛИРОВАНИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРУБОПРОВОДНЫХ  
СИСТЕМ**

*Харчук А.С.<sup>1</sup>,*

*бакалавр,*

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева.*

*Москва, Россия*

**Аннотация**

В работе представлены результаты моделирования и проектирования элементов трубопроводной арматуры в системе САПР - NanoCAD x64 23.1 и результаты моделировании при гидравлическом расчете и определении суммарных потерь давления в трубопроводе и элементах трубопроводной арматуры при турбулентном режиме течения, также представлены результаты моделирования линейных потерь давления и суммарных потерь давления в местных сопротивлениях трубопровода при учете взаимного влияния местных гидравлических сопротивлений друг на друга (интерференции).

**Ключевые слова:** Проектирование и моделирование трубопроводных систем, потери давления, местные сопротивления, длина трубопровода, внутренней диаметра трубопровода, удельная линейная потеря давления, шероховатости стенок, потери давления на местных сопротивлениях, коэффициент взаимного влияния, интерференция.

---

<sup>1</sup> Научный руководитель: **Паливеш М.С.**, кандидат технических наук, доцент, Российской государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

**Paliivets M.S.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University - Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russia

Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМИ ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

**MODERN DIGITAL TECHNOLOGIES IN MODELING AND  
DESIGNING PIPELINE SYSTEMS**

***Kharchuk A.S.,***

*bachelor,*

*Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev.*

*Moscow, Russia*

**Abstract**

The paper presents the results of modeling and designing pipeline fittings elements in the NanoCAD x64 23.1 CAD system and the results of modeling in hydraulic calculations and determining the total pressure losses in a pipeline and pipeline fittings elements under turbulent flow conditions. It also presents the results of modeling linear pressure losses and total pressure losses in local pipeline resistances, taking into account the mutual influence of local hydraulic resistances on each other (interference).

**Keywords:** Design and modeling of pipeline systems, pressure losses, local resistances, pipeline length, pipeline internal diameter, specific linear pressure loss, wall roughness, pressure losses due to local resistances, mutual influence coefficient, interference.

**Введение**

Гидравлические расчеты трубопроводов включают определение суммарных потерь напора, состоящих из линейных потерь (по длине) и местных потерь (в элементах арматуры). Эти расчеты, как правило, основываются на допущении об отсутствии взаимного влияния между отдельными местными сопротивлениями [2,3] и используют методики, предложенные И.Е. Идельчиком. Результаты численного моделирования

представлены в работах [4,5,6]. Взаимовлияние местных сопротивлений исследовано экспериментально в статьях и монографиях [6,7,8,10].

При проектировании и моделировании трубопроводных систем расчеты гидравлических потерь (включая линейные потери и потери в местном сопротивлении арматуры) обычно проводятся аддитивно, без учета их потенциального взаимного влияния. Это упрощение может снижать точность итоговых гидравлических расчетов.

### **Материал и методы исследований.**

Цель исследования:

- Смоделировать потери давления на местных сопротивлениях в узле «отвод-отвод», «Отвод-отвод-отвод»;
- Зaproектировать в системе NanoCAD x64 23.1 узлы местных сопротивлений на основе гидравлических параметров созданной программы.

Задачи исследования:

- Определить влияние местных сопротивлений на изменение давления в трубопроводе;
- Вычислить процентное изменение давления в трубопроводе под влиянием местных сопротивлений в узле «Отвод-отвод», «Отвод-отвод-отвод» и «Отвод – арматура», «Отвод – арматура», «Арматура – отвод», «Напорный патрубок насоса – трубные элементы и арматура».

Результаты исследования основаны на анализе справочной информации [1] и экспериментальных данных, полученных в ходе гидравлических испытаний металлоplastikовых, металлополимерных или ПНД трубопроводов.

Для моделирования и расчетов использовались методы объектно-ориентированного программирования (ООП) в среде Borland Delphi 7 на языке Object Pascal. Моделирование потерь давления проводилось на основе обзора актуальных научных публикаций и справочных данных. При гидравлическом расчете короткого трубопровода также применялись методы анализа и

учитывалось взаимное влияние местных сопротивлений с использованием соответствующих коэффициентов для каждого узла.

Для расчёта потерь давления в трубопроводе использовалась формула [1]:

$$\Delta P = R \cdot l + Z, \quad (1)$$

где  $R$  – удельные линейные потери давления на каждый метр длины трубопровода, измеряемые в Па/м (Эти значения обычно берутся из экспериментальных данных или справочников [1]);  $l$  – общая длина рассматриваемого трубопровода, м;  $Z$  – потери давления, возникающие в арматуре трубопровода, Па.

Для расчета потерь давления на местных сопротивлениях использовалась формула с поправкой на коэффициент их взаимного влияния [1]:  $\psi = \zeta_{узла} / \sum \zeta$  (Таблица 1):

$$Z = \psi \sum \zeta \frac{V^2}{2} \rho, \quad (2)$$

где  $\psi$  – коэффициент взаимного влияния местных сопротивлений (определяется по справочным/экспериментальным данным [5-8];  $\zeta_{узла}$  – коэффициент местных сопротивлений, характерный для конкретного узла;  $\sum \zeta$  – суммарный коэффициент единичных местных сопротивлений;  $\psi \sum \zeta$  – общая сумма коэффициентов местных сопротивлений на рассматриваемом участке трубопровода;  $V$  – скорость потока в трубопроводе, измеряемая в м/с;  $\rho$  – плотность воды, выраженная в килограммах на кубический метр, кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 1 – Коэффициенты взаимного влияния узлов сопротивлений  $\psi$ , использованные при моделировании потерь напора

№ п/п	Узел местных сопротивлений	Значение коэффициента взаимного влияния $\psi$
1.	«Отвод – арматура»,	$\psi=0,85\dots1,25$

№ п/п	Узел местных сопротивлений	Значение коэффициента взаимного влияния $\psi$
	«отвод – отвод», «отвод – арматура», «арматура – отвод», «напорный патрубок насоса – трубные элементы и арматура»	
2.	«Отвод – отвод» (U-образный узел), «Отвод – отвод – отвод» (S-образный узел)	1. $\psi=0,6\dots1,0$ 2. $\psi=0,71\dots0,92;0,83\dots0,92$ 3. $\psi=0,68..0,81;0,5\dots0,69$

Коэффициенты местных сопротивлений (для поворотов, отводов, фитингов и арматуры) суммировались простым сложением, если эти элементы находились достаточно далеко друг от друга. Если же они располагались близко  $l < 10d$ , то общая сумма их коэффициентов дополнительно корректировалась (умножалась на  $\psi$ ) с учетом их взаимного влияния.

В результате расчетов были получены значения площади сечения  $\omega$  и скорости течения воды  $V$ :

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3)$$

$$V = \frac{Q}{\omega}. \quad (4)$$

При определении удельных линейных потерь давления рассчитывались такие параметры, как коэффициент кинематической вязкости воды  $v$  и число Рейнольдса  $Re$ :

$$Re = \frac{Vd}{v}, \quad (5)$$

где  $V$  – скорость потока, м/с;  $d$  – диаметр трубопровода, м;  $\omega$  – площадь сечения трубы,  $\text{м}^2$ ;  $Q$  – расход воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $v$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

## **Результаты и обсуждение.**

Представленные данные, полученные в программной среде Borland Delphi 7 [9,10], иллюстрируют результаты моделирования потерь давления в трубопроводе ( $l=10\text{м}$ ,  $d=0,016\text{м}$ ). Особое внимание уделено сравнению двух подходов: с учетом взаимного влияния местных сопротивлений в арматуре (рис. 1) и без учета этого влияния (рис. 2).

Моделирование и расчет потерь давления, обусловленных взаимным влиянием отдельных элементов трубопроводной арматуры (см. рис. 1), основывались на таких характеристиках системы, как общая длина  $l$  и внутренний диаметр трубопровода  $d$ , а также плотность  $\rho$  и расход  $Q$  транспортируемой воды [1].

При расчетах использовались удельные потери давления на единицу длины трубопровода и суммарный коэффициент местных сопротивлений  $\sum \zeta$ . Особое внимание уделялось учету коэффициентов взаимного влияния для близкорасположенных друг к другу элементов в следующих конфигурациях: «диафрагма-диафрагма», «тройник-тройник», «отвод-арматура», «запорная арматура- запорная арматура», «отвод-отвод», «отвод-отвод-отвод», «проходной клапан- проходной клапан», «запорная арматура- тройник»/

Таким образом, комплексный подход позволил оценить потери давления с учетом нелинейного взаимодействия различных типов арматуры в конкретных узлах системы.

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

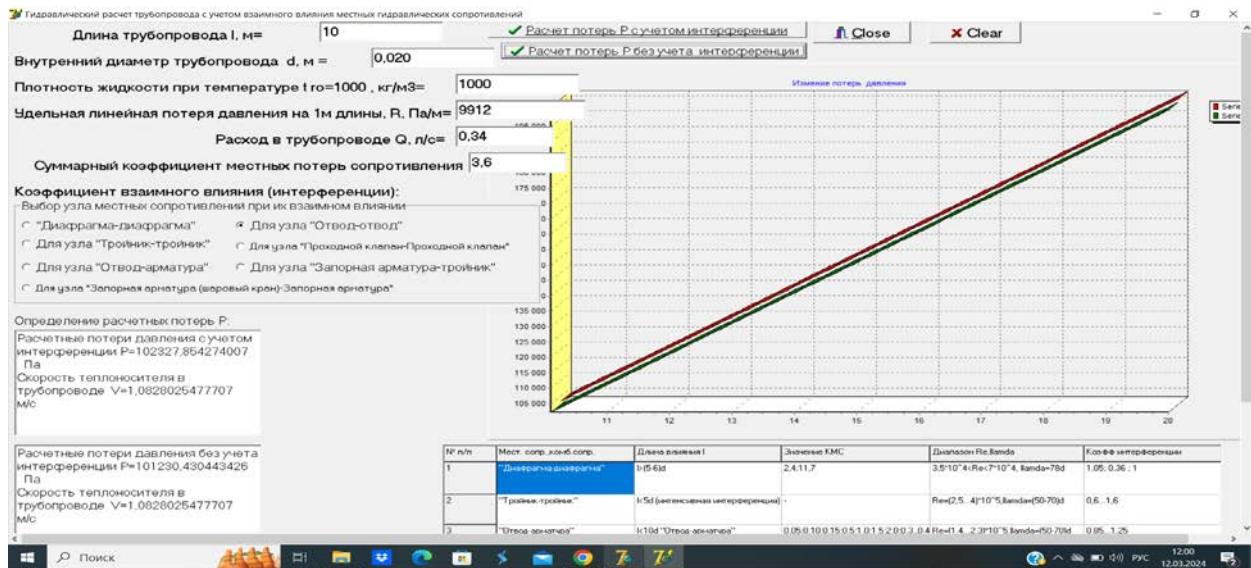


Рис. 1 – Результаты расчетов потерь давления с учетом интерференции и без учета взаимного влияния местных сопротивлений [9]

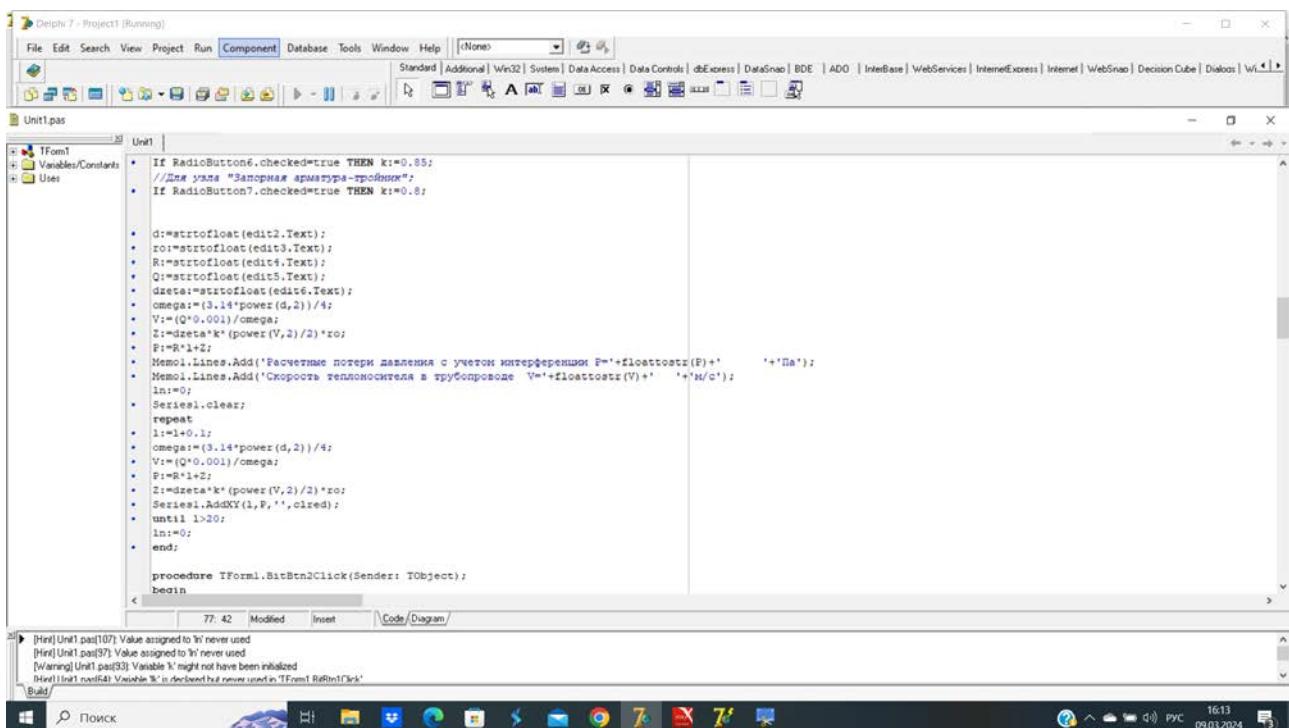
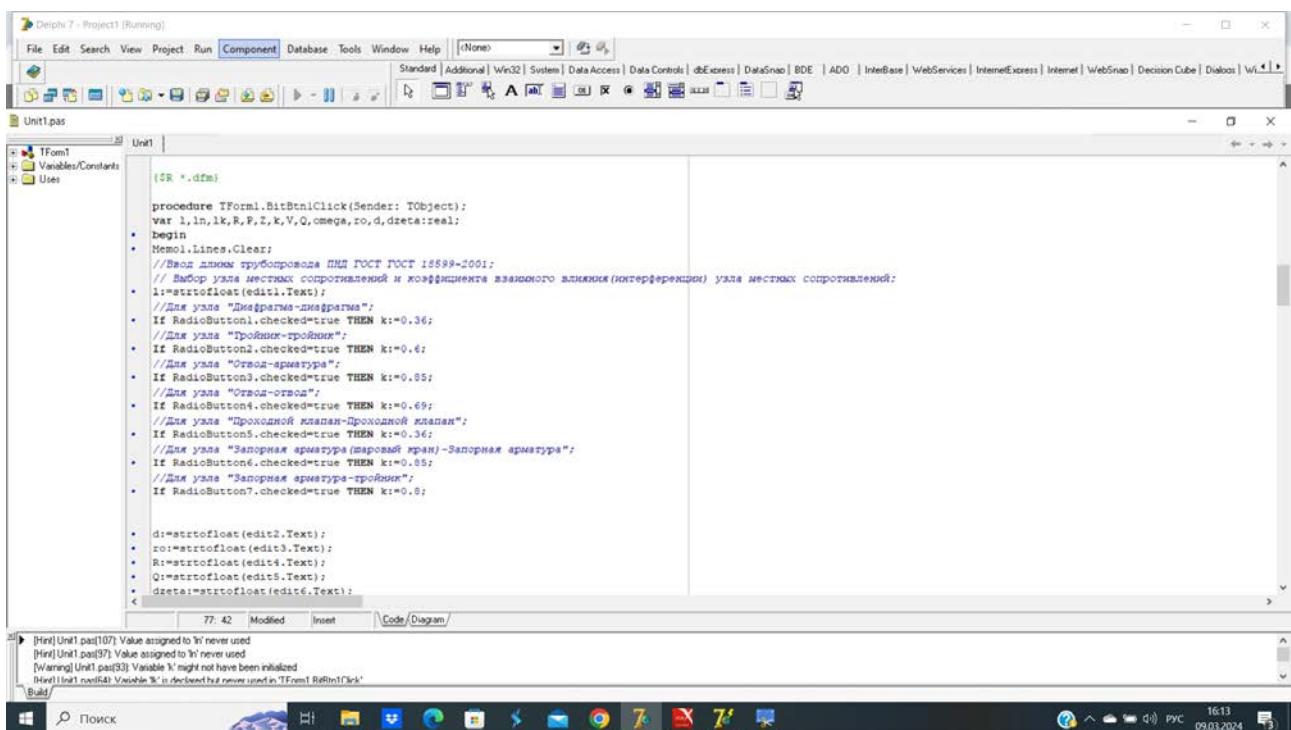


Рис. 2 – Расчет потерь давления без учета влияния местных сопротивлений друг на друга (интерференции) [9]



```

procedure TForm1.BitBtn1Click(Sender: TObject);
var l,ln,1k,R,P,Z,k,V,Q,omega,ro,d,dzeta:real;
begin
  Mem1.Lines.Clear;
  //Блок данных трубопровода ПДП ГОСТ 15599-2001;
  //Выбор узла местных сопротивлений и коэффициента взаимного влияния(интерференции) узла местных сопротивлений;
  l:=strtofloat(edit1.Text);
  //Узел "Изогнутые-плоскограны";
  If RadioButton1.checked=true THEN k:=0.36;
  //Узел "Прямые-трубопровод";
  If RadioButton2.checked=true THEN k:=0.4;
  //Узел "Отвод-арматура";
  If RadioButton3.checked=true THEN k:=0.05;
  //Узел "Отвод-отвод";
  If RadioButton4.checked=true THEN k:=0.69;
  //Узел "Прокладной изолап-Прокладной изолап";
  If RadioButton5.checked=true THEN k:=0.36;
  //Узел "Запорная арматура (шаровой грань)-Запорная арматура";
  If RadioButton6.checked=true THEN k:=0.05;
  //Узел "Запорная арматура-трубопровод";
  If RadioButton7.checked=true THEN k:=0.8;
  //Узел "Сливной отвод";

  d:=strtofloat(edit2.Text);
  ro:=strtofloat(edit3.Text);
  R:=strtofloat(edit4.Text);
  Q:=strtofloat(edit5.Text);
  dzeta:=strtofloat(edit6.Text);
  <

```

[Hint] Unit1.pas[107] Value assigned to 'l' never used  
[Hint] Unit1.pas[97] Value assigned to 'ln' never used  
[Warning] Unit1.pas[33] Variable 'V' might not have been initialized  
[Warning] Unit1.pas[44] Variable 'dzeta' is declared but never used in 'TForm1.BitBtn1Click'

Рис.3 – Расчет потерь давления с учетом взаимного влияния  
(интерференции) [9]

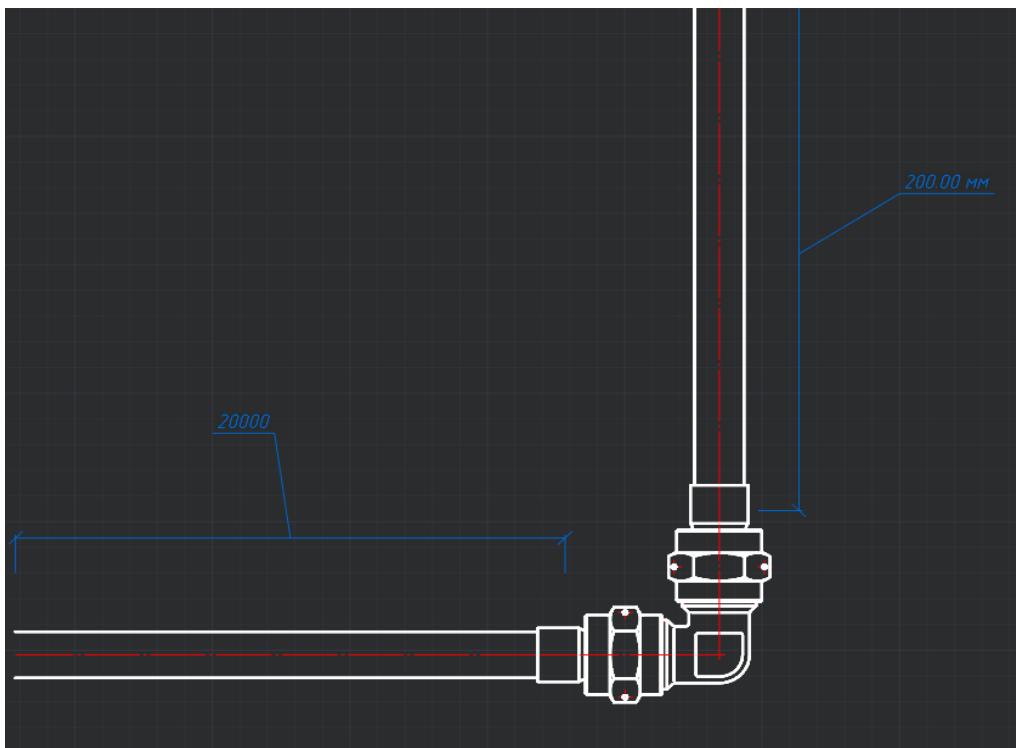


Рис. 4 – Зaproектированный U-образный узел местных сопротивлений  
«Отвод-отвод» в среде NanoCAD<sup>2</sup>

Примечание 2 – Авторская разработка

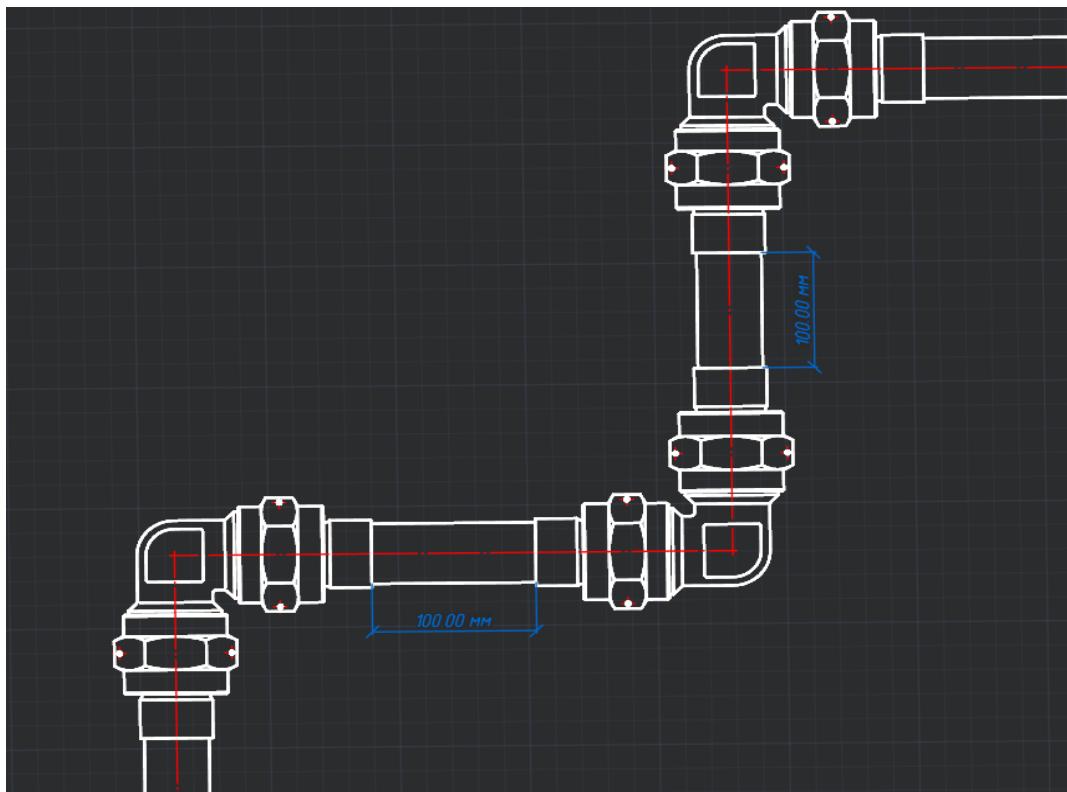


Рис.5 – Зaproектированный S-образный узел местных сопротивлений  
«Отвод-отвод-отвод» в среде NanoCAD<sup>3</sup>

Примечание 3 – Авторская разработка

Моделирование показало, что учет взаимного влияния местных сопротивлений (рис. 1, 3) приводит к снижению потерь давления по длине трубопровода в диапазоне от 101230,43 Па до 102327,85 Па. При этом игнорирование данного фактора (рис. 2) демонстрирует существенный рост потерь давления – от 110000 Па до 200000 Па.

Моделирования потерь напора.

Относительное расхождение с данными моделирования потерь давления с учетом взаимного влияния местных сопротивлений (рис.3) с учетом известных коэффициентов взаимного влияния местных сопротивлений [4-8,10] и без учета взаимного влияния местных сопротивлений (рис.2) составило до 4,15%.

## **Заключение.**

В результате моделирования потерь напора в рассматриваемых узлах местных сопротивлений наблюдалось повышение давления по всей длине трубопровода на 1,08% (1097 Па) при учете коэффициентов взаимного влияния. Относительное расхождение может доходить от 1 до 3 % в зависимости от конфигурации узла местных сопротивлений. По полученным данным были запроектированы в системе NanoCAD узлы местных сопротивлений «Отвод-отвод», «Отвод-отвод-отвод» (Рис. 4, 5) с расстоянием между отводами  $l \leq 5d$ , где  $d$ -внутренний диаметр трубопровода. Результаты расчетов показывают, что благодаря близкому расположению местных сопротивлений трубопроводной арматуры ( $l \leq 5d$ ) можно добиться как снижения, так и повышения давления по всей длине трубопровода, и как следствие экономии при проектировании насосного оборудования и выборе менее мощных насосов. В нашем случае наблюдалось повышение давления, поэтому чтобы уменьшить давление в трубопроводе нужно использовать U-образную систему соединения трубопровода (Рис.4), а также использовать металлопластиковые, металлополимерные или ПНД трубопроводы с минимальным коэффициентом эквивалентной шероховатости  $\Delta=k_e=0,007$  мм в отличие от новых стальных трубопроводов  $\Delta=k_e=0,02\dots0,10$  мм. Результаты расчета потерь давления, полученные с помощью программы моделирования, могут быть использованы в следующих целях:

Проектирование и компоновка трубопроводных систем: моделирование узлов местных сопротивлений помогает оптимизировать конфигурацию и размещение компонентов трубопроводной системы. Гидравлический расчет: программа позволяет выполнить точный гидравлический расчет, учитывая такие параметры, как:

- Длина и внутренний диаметр трубопровода
- Плотность воды в зависимости от температуры

- Удельные линейные потери давления
- Расход жидкости
- Коэффициенты местных потерь сопротивлений (на основе справочных или экспериментальных данных).

**Выбор насосного оборудования:** Предварительное моделирование потерь давления позволяет подобрать насосы с соответствующей подачей и учетом общих потерь в системе. Ключевое преимущество: Использование программы моделирования обеспечивает точность расчетов и помогает принять обоснованные решения при проектировании и подборе оборудования.

**Благодарность.** Автор выражает благодарность кандидату технических наук, доценту Палищеву Максиму Сергеевичу за оказанную помощь и ценные советы при подготовке статьи.

### **Библиографический список:**

1. Афонин, А.Н., Сушицкий, О.И. Руководство по проектированию, монтажу и эксплуатации систем холодного, горячего водоснабжения и отопления с использованием металлополимерных труб ТМ VALTEC. Под редакцией Горбунова В.И. / А.Н. Афонин, О.И. Сушицкий. М.: ОАО «НИИСантехники», 2009. 199 с.
2. Грачев, И.Г., Низовцев, В.М., Пирогов, С.Ю., Савищенко, Н.П., Юрьев, А.С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / И.Г. Грачев, В.М. Низовцев, С.Ю. Пирогов, Н.П. Савищенко, А.С. Юрьев. Под ред. А. С. Юрьева. С.-Пб. : АНО НПО «Мир и семья», 2001. 1154 с.
3. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. – Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960. 464 с.
4. Левинтан, Е. Ю. Численное моделирование взаимного влияния элементов гидравлических систем / Е. Ю. Левинтан, А. А. Шейпак // Известия Московского государственного индустриального университета. 2009. № 4(17). С. 50-55.

5. Снежко, В. Л. Взаимное влияние местных гидравлических сопротивлений в трубопроводах блочно-комплектных насосных станций / В. Л. Снежко // Отраслевые аспекты технических наук. 2011. № 2. С. 06-08.
6. Снежко, В.Л., Паливцец, М.С. Кинематическая структура потока и гидравлические сопротивления узла «регулируемая задвижка-тройник» в напорном водоводе // Природообустройство. 2010. № 2. С. 54-59.
7. Ковалев-Кривоносов, П.А., Зюбан, В.А., Умbrasas, М.-Р.А. Рекомендации по компоновке отводов и арматуры в составе блоков и агрегатов судовых систем. Сб. НТО им. А.Н.Крылова. Л.: Судостроение, 1978. Вып. 285. С. 95-100.
8. Гольденберг, И.З., Умbrasas, М.-Р.А. Связь гидравлических потерь со скоростью вторичного течения в отводах трубопроводов. – Труды / Калининградский техн. ин-т рыб.пром. и хоз., 1975. Вып. 58. С. 36-42.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023613264 Российская Федерация. «Расчет гидравлических потерь напора для проектирования и компоновки элементов трубопроводной арматуры» : № 2023611858 : заявл. 03.02.2023 : опубл. 14.02.2023 / М. С. Паливцец, В. Л. Снежко, Е. В. Щедрина, О. Н. Ивашова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». EDN IUHUIQ.
10. Паливцец, М.С. Взаимное влияние в арматурных элементах и узлах напорных водоводов / М. С. Паливцец. – Saarbrucken, Deutschland : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 216 с. – ISBN 978-3-659-43590-4. – EDN XXWLAM

© Харчук А.С., 2026.