

## Программа расчёта магистрального нефтепровода в системе MathCAD

Турсуканова Индира Каиргельдиновна  
студентка

Республика Казахстан, Павлодарский государственный университет  
им.С.Торайгырова

Цель статьи – привлечь внимание проектировщиков магистральных нефтепроводов (МН) к использованию в своих расчётах системы MathCAD. Ниже приводится программа расчёта МН в системе MathCAD. В основу программы положен пример 5.1 «Технологический расчёт МН», приведённый в [1]. Начальные сведения по работе в среде MathCAD, достаточные для создания подобной программы, даны в [2]. Из-за ограниченности объёма статьи некоторые части программы сокращены.

**Задание.** Сделать гидравлический расчёт нефтепровода длиной 600 км, пропускной способностью 34 млн т/год. Всё ниже написанное, включая и комментарии, может составлять содержание программы расчёта – система сама определяет, где текст, а где математические выражения (для наглядности в текстовой части символы величин будем писать курсивом, а в формулах Mathcad – вертикальным шрифтом).

Задаём **исходные данные** для расчёта МН, т.е. присваиваем буквенным обозначениям величин числовые значения. Ввод символа присваивания – двоеточия с равно «:=» осуществляется нажатием клавиши с символом двоеточия «:».

Плотность нефти при стандартной температуре  $\rho_{20} := 852 \text{ кг/м}^3$ .

Кинематическая вязкость при 20 и 50 °С:  $\nu_{20} := 48 \text{ сСт}$ ,  $\nu_{50} := 22 \text{ сСт}$ .

Расчётная температура нефти  $t_p := 7 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Массовая пропускная способность нефтепровода  $G_r := 34 \text{ млн т/год}$ .

Разность геодезических отметок в начале и в конце нефтепровода  $\Delta Z := 100 \text{ м}$ .

Протяжённость нефтепровода (перевальные точки отсутствуют)  $L_{тр} := 600 \text{ км}$  или  $L := L_{тр} \cdot 10^3 = 600000 \text{ м}$ . Ускорение свободного падения  $g := 9.81 \text{ м/с}^2$ .

**Вычисление плотности и вязкости нефти при  $t_p$ .** Плотность нефти определяем по формуле Д. И. Менделеева (для контроля за вычислениями выводим в скобках значения величин, входящих в правую часть формулы, путём нажатия равно после символа величины):

$$(\rho_{20} = 852 ; t_p = 7)$$

$$\xi := 1.825 - 0.001315 \cdot \rho_{20} = 0.705 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$\rho := \rho_{20} + \xi \cdot (20 - t_p) = 861.160 \text{ кг/м}^3.$$

Кинематическую вязкость нефти рассчитываем по формуле Рейнольдса.

Вводим обозначения:  $t_1 := 50 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $t_2 := 20 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $\nu_1 := \nu_{50} \cdot 10^{-6} = 2.2 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

$$\nu_2 := \nu_{20} \cdot 10^{-6} = 4.8 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; \quad u := \left( \frac{1}{t_1 - t_2} \right) \cdot \ln \left( \frac{\nu_2}{\nu_1} \right) = 0.026011/\text{К};$$

$$\nu := \nu_1 \cdot \exp[-u \cdot (t_p - t_1)] = 6.731 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

**Определение плановой пропускной способности.** Наружный диаметр определяется по таблице приложения П.18 [1] по заданной пропускной способности, т.к.  $G_r = 34 \text{ млн т/год}$ , то  $D := 1020 \text{ мм}$ . Расчётное число рабочих дней МН согласно таблице П.17 [1]  $N_p := 349$ .

Плановая объёмная пропускная способность нефтепровода  $Q_0$

$$(G_r = 34; N_p = 349; \rho = 861.16)$$

$$Q_0 := \frac{G_r \cdot 10^9}{24 \cdot N_p \cdot \rho} = 4713.661 \text{ м}^3/\text{ч},$$

или секундный расход  $Q_c := \frac{Q_0}{3600} = 1.309 \text{ м}^3/\text{с}.$

**Выбор марки магистрального (рабочего) и подпорного насосов.** Для  $Q_0 = 4713.7 \text{ м}^3/\text{ч}$  по таблицам 3.4 и 3.8 [3] выбираем магистральный насос НМ 5000-210 и подпорный насос НПВ 5000-120.

В примере [1] приведены характеристики работы насосов при плановой подаче.

Магистральный насос:  $H_M := 160 \text{ м}$  (ротор нижний  $D_2 = 405 \text{ мм}$ ), присваиваем  $D_2 := 405 \text{ мм}$ . Подпорный насос:  $H_P := 123 \text{ м}$  (ротор верхний  $D_2 = 640 \text{ мм}$ ),  $D_2 := 640 \text{ мм}$ .

Считаем, что на головной станции будет установлено 3 магистральных (основных) и 1 подпорный насос.

Находим **рабочее давление** в трубопроводе:

$$(\rho = 861.16; H_P = 123; H_M = 160; g = 9.81)$$

$$p_{\text{раб}} := 10^{-6} \cdot (H_P + 3 \cdot H_M) \cdot \rho \cdot g = 5.094 \text{ МПа. Округляем } p_{\text{раб}} := 5.1 \text{ МПа.}$$

**Определение эмпирических коэффициентов  $a$  и  $b$  для насосов.** Для МН с нижним ротором в примере приведены для двух точек характеристики насоса:

$$Q_1 := 3200 \text{ м}^3/\text{ч}; H_1 := 207 \text{ м}; \quad Q_2 := 4800 \text{ м}^3/\text{ч}; H_2 := 157 \text{ м}.$$

Значения коэффициентов определяются по формулам:

$$a_0 := \frac{H_1 \cdot Q_2^2 - H_2 \cdot Q_1^2}{Q_2^2 - Q_1^2} = 247 \text{ м}; \quad b_0 := \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2} = 3.906 \times 10^{-6} \text{ ч}^2/\text{м}^5.$$

При плановой подаче  $Q := Q_0 = 4713.661 \text{ м}^3/\text{ч}$  напор МН с нижним ротором будет равен  $H_M := a_0 - b_0 \cdot Q^2 = 160.209 \text{ м}$  (160 м в примере).

Фиксируем значение напора стандартного магистрального насоса (без обрезки ротора) при плановой подаче  $Q_0$   $H_{M0} := H_M = 160.209 \text{ м}$ .

Для подпорного насоса (ПН) НПВ 5000-120\* с верхним ротором значения коэффициентов выбираем по таблице 3.8 [5]:

$$a_P := 151.9 \text{ м}; \quad b_P := 1.33 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^2/\text{м}^5.$$

Для  $Q := 5000 \text{ м}^3/\text{ч}$   $H_P := a_P - b_P \cdot Q^2 = 118.65 \text{ м}$  (120 м в примере). При плановой подаче  $Q := Q_0 = 4713.661 \text{ м}^3/\text{ч}$   $H_P := a_P - b_P \cdot Q^2 = 122.35 \text{ м}$  (123 м [1]). Для сближения результатов расчёта уточняем значения коэффициентов:

$$a_P := 151 \text{ м}; \quad b_P := 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^2/\text{м}^5.$$

При плановой подаче  $H_P := a_P - b_P \cdot Q^2 = 123.005 \text{ м}$  (123 м в примере [1]).

Фиксируем значение напора ПН при плановой подаче  $H_{P0} := H_P = 123.005 \text{ м}$ .

**Расчёт толщины стенки трубопровода.** Предварительно по таблице П.19 [3] для рабочего давления меньше 5,4 МПа и диаметра  $D = 1020 \text{ мм}$  выбираем трубы ВТЗ марки 17Г1С, для которых  $\sigma_{\text{пр}} := 510 \text{ МПа}$ ;  $k_1 := 1.4$ ;  $m := 0.9$ ;  $k_H := 1$ ;  $n_1 := 1.15$ .

Расчётное сопротивление растяжению

$$R_1 := \sigma_{\text{вр}} \frac{m}{k_1 \cdot k_H} = 327.857 \text{ МПа.}$$

Толщина стенки трубопровода ( $D = 1020 \text{ мм}$ ;  $p_{\text{раб}} = 5.1 \text{ МПа}$ )

$$\delta := \sigma_{\text{вр}} \frac{n_1 \cdot p_{\text{раб}} \cdot D}{2 \cdot (n_1 \cdot p_{\text{раб}} + R_1)} = 8.963 \text{ мм}.$$

Округляем до  $\delta := 9 \text{ мм}$  (в примере для стали 13Г2АФ получили  $\delta = 9,2 \text{ мм}$ ).

Внутренний диаметр трубопровода  $d := D - 2 \cdot \delta = 1002 \text{ мм}$  (1001,6 мм [1]) или в метрах  $d := d \cdot 10^{-3} = 1.002 \text{ м}$ ,  $\delta := \delta \cdot 10^{-3} = 0.009 \text{ м}$ .

**Гидравлический расчёт нефтепровода.** Число Рейнольдса ( $Q_c = 1.309 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

$$v = 6.731 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}) \quad \text{Re} := \frac{4 \cdot Q_c}{\pi \cdot d \cdot v} = 24719.3.$$

Эквивалентная шероховатость стенок трубопровода  $k_3 := 0.15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Переходные (граничные) числа Рейнольдса:

$$\text{Re}_1 := \frac{10 \cdot d}{k_3} = 66800; \quad \text{Re}_2 := \frac{500 \cdot d}{k_3} = 3340000.$$

Поскольку  $\text{Re}_{\text{кр}} = 2320 < \text{Re} = 24719 < \text{Re}_1 = 66800$ , то течение происходит в зоне гидравлически гладких труб, где коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  определяется

по формуле Блазиуса  $\lambda := \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} = 0.02523$ .

Гидравлический уклон определяем по формуле Лейбензона, где для этой зоны  $m := 0.25$  и  $\beta := 0.0246 \text{ с}^2/\text{м}$  ( $Q_c = 1.309$ ;  $v = 6.731 \times 10^{-5}$ ;  $d = 1.002$ ),

$$i := \beta \cdot \frac{Q_c^{2-m} \cdot v^m}{d^{5-m}} = 0.003537.$$

Фиксируем значение  $i$  при плановой подаче  $i_0 := i = 0.003537$ .

**Расчёт числа станций.** Потребный напор на перекачку нефти при остаточном напоре на конечном пункте (КП)  $h_{\text{ост}} := 30 \text{ м}$  ( $\Delta Z = 100$ ,  $L = 600000$ )

$$H_{\text{потреб}} := 1.01 \cdot i \cdot L + \Delta Z + h_{\text{ост}} = 2273.628 \text{ м},$$

где 1,01 – коэффициент, учитывающий надбавку на местные сопротивления.

Напор одной станции со стандартными роторами (индекс «0») при числе МН  $m_{\text{МН}} := 3$  и внутростанционных потерях  $h_{\text{вн}} := 15 \text{ м}$  ( $H_{\text{М0}} = 160.209$ )

$$H_{\text{ст0}} := m_{\text{МН}} \cdot H_{\text{М0}} - h_{\text{вн}} = 465.626 \text{ м}.$$

Число станций для обеспечения потребного напора ( $H_{\text{п0}} = 123.005$ )

$$n := \frac{H_{\text{потреб}} - H_{\text{п0}}}{H_{\text{ст0}}} = 4.619.$$

**Округление числа станций в большую сторону**  $n_{\text{ст1}} := 5$  (вариант с округлением числа станций в меньшую сторону до  $n = 4$  – с лупингом – здесь опущен).

Действительно необходимый напор одной станции

$$H_{1\text{ст}} := \frac{H_{\text{потреб}} - H_{\text{п0}}}{n_{\text{ст1}}} = 430.125 \text{ м}.$$

Действительный напор одного насоса ( $h_{\text{вн}} = 15$ ;  $m_{\text{МН}} = 3$ )

$$H_{\text{М}} := \frac{H_{1\text{ст}} + h_{\text{вн}}}{m_{\text{МН}}} = 148.375 \text{ м}.$$

Производим обрезку рабочего колеса. Обозначим отношение диаметров

$D_{21}/D_2 = \chi$  и определим его ( $a_0 = 247$ ;  $b_0 = 3.906 \times 10^{-6}$ ;  $Q_0 = 4713.661$ )

$$\chi := \sqrt{\frac{H_M + b_0 \cdot Q_0^2}{a_0}} = 0.9758,$$

т. е. обрезаем на 2,42 % (в примере забыли извлечь корень из 0,948, в результате приняли обрезку 5,2 %).

Новый диаметр ротора ( $D_2 = 405$ )  $D_{21} := D_2 \cdot \chi = 395.2$  мм.

После обрезки колеса насоса изменяется его напорная характеристика:

$$a := \chi^2 \cdot a_0 = 235.166 \text{ м}; \quad b := b_0 = 3.906 \times 10^{-6} \text{ ч}^2 / \text{м}^5 \quad (a_0 = 247).$$

Сравнение с ранее найденным напором ( $H_M = 148.375$  м)

$$H_M := a - b \cdot Q^2 = 148.375 \text{ м.}$$

**Задание профиля трассы.** Используя данные таблиц 5.2 и 5.3 [1], заносим значения координат  $x$  (км) точек трассы и соответствующие им значения  $Z$  (м) геодезических высот в матрицу (таблицу)  $M$ . Задание шаблона матрицы производится одновременным нажатием клавиш [Ctrl+M]. Начало нумерации в матрице с единицы (по умолчанию – с нуля) задаём путём записи  $ORIGIN := 1$ .

Выделяем 1-й и 2-й столбцы матрицы (шаблон для степени (1) вводится нажатием клавиш [Ctrl+6]).

$$M := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 111 & 18 \\ 150 & 28 \\ 227.1 & 37 \\ 274.5 & 48 \\ 339 & 57 \\ 399 & 68 \\ 452.4 & 74 \\ 600 & 100 \end{pmatrix} \quad X := M^{(1)} \quad Y := M^{(2)} \quad X := \begin{pmatrix} 0 \\ 111 \\ 150 \\ 227.1 \\ 274.5 \\ 339 \\ 399 \\ 452.4 \\ 600 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 0 \\ 18 \\ 28 \\ 37 \\ 48 \\ 57 \\ 68 \\ 74 \\ 100 \end{pmatrix}$$

Проверка:  $Z_n := M_{1,2} = 0$  м;  $Z_k := M_{9,2} = 100$  м.

С помощью программы сплайновой интерполяции Mathcad табличные значения преобразуем в кривую зависимости высоты  $Z$  от координаты  $x$ :

$$S := \text{lspline}(X, Y); \quad Z(x) := \text{interp}(S, X, Y, x).$$

Проверяем начальные и конечные высоты:  $Z(0) = 0$  м;  $Z(L_{тр}) = 100$  м.

**Расстановка пяти станций на трассе.** Расстановка перекачивающих станций осуществляется аналитически с использованием системы Mathcad.

Линии падения напора от 1-й станции (линии гидравлического уклона):

– без учёта напора от подпорного насоса  $H_1(x) := Z_n + H_{ст} - 1.01 \cdot i \cdot x \cdot 1000$ ;

– с учётом напора от подпорного насоса  $H_{1п}(x) := H_n + Z_n + H_{ст} - 1.01 \cdot i \cdot x \cdot 1000$ .

Аналогичным образом записываются линии падения напоров от 2-х, 3-х, 4-х и 5-ти станций.

Координата второй станции находится как точка пересечения линии сжатого профиля трассы  $Z(x)$  с линией падения напора от первой станции  $H_1(x)$ . Точка пересечения находится путём приравнивания этих уравнений и решения их с помощью оператора Given-Find (Дано-Найти). Знак логического равенства (жирное равно) в уравнениях вводится нажатием клавиш [Ctrl+=]. Задаём начальное приближение, например,  $x := 110$  км. Записываем блок решения:

$$\text{Given } H_1(x) := Z(x); \quad x_2 := \text{Find}(x) = 115.05 \text{ км}; \quad Z_2 := Z(x_2) = 19.1 \text{ м.}$$

Аналогичным образом находим координаты 3-ей, 4-ой и 5-ой станций:

$$x_3 = 230.26 \text{ км}, \quad Z_3 = 37.6 \text{ м}; \quad x_4 = 344.95 \text{ км}, \quad Z_4 = 58 \text{ м}; \quad x_5 = 460.59 \text{ км}; \quad Z_5 = 74.9 \text{ м.}$$

Задание линии полных напоров (с учётом подпорных насосов)  $H_{п.н}(x)$

осуществляется с помощью программного модуля. Для создания программного модуля используется встроенная функция Add line, которая создаёт вертикальную линию слева. Предварительно задаём массив чисел  $x := 0..600$  км (символ последовательности чисел ".." задаётся нажатием клавиши, содержащей ";").

$$H_{п.н}(x) := \begin{cases} H_{1п}(x) & \text{if } 0 \leq x \leq x_2 \\ H_{2п}(x) & \text{if } x_2 \leq x \leq x_3 \\ H_{3п}(x) & \text{if } x_3 \leq x \leq x_4 \\ H_{4п}(x) & \text{if } x_4 \leq x \leq x_5 \\ H_{5п}(x) & \text{if } x_5 \leq x \leq x_k \end{cases}$$

На рисунке 1 приведены прямые линии гидравлических уклонов  $H_1(x) - H_4(x)$ , дающие точки пересечения (положение НПС) с линией профиля трассы  $Z(x)$ , и зигзагообразная линия изменения полных напоров  $H_{п.н}(x)$  вдоль трассы.

Проверка правильности расчёта. В конечном пункте разность напора и геодезической высоты должна равняться остаточному напору ( $h_{ост} = 30$ ;  $L_{тр} = 600$ ;  $H_{п.н}(L_{тр}) = 130$ ;  $Z_k = 100$ )  $H_{п.н}(L_{тр}) - Z_k = 30$  м. Расчёт сходится.

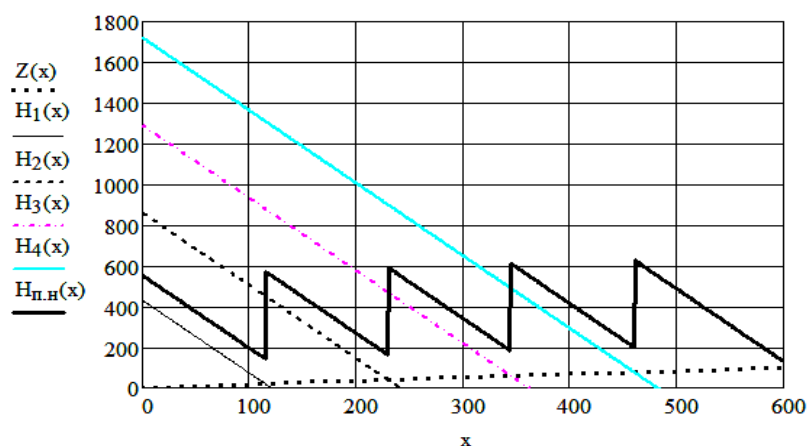


Рисунок 1. Расстановка пяти станций на трассе МН

### Выводы

1 Разработана программа расчёта магистрального нефтепровода в системе Mathcad, записываемая в традиционных математических символах, что делает её наглядной и удобной для расчётов и графического построения необходимых зависимостей.

2 Преимущество данной программы перед другими программами заключается в её доступности и возможности любому пользователю изменять её отдельные блоки без изучения логики традиционного программирования.

3 Данная программа может быть использована как в курсовом, так и дипломном проектировании, а также в проектных организациях при проектировании и исследовании режимов работы нефтепроводов.

### Литература

1 Транспорт и хранение нефти и газа в примерах и задачах : учеб, пособие / Под общей редакцией Ю. Д. Земенкова. – СПб. : Недра, 2004. – 544 с. : ил.

2 Макушев Ю. П. Интегральное и дифференциальное исчисления в приложении к технике : монография / Ю. П. Макушев, Т. А. Полякова, В. В. Рындин, Т. Т. Токтаганов. – Павлодар : Кереку, 2013. – 330 с. : ил.

3 Тугунов П. И. Типовые расчёты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов : учеб. пособие / П. И. Тугунов, В. Ф. Новосёлов, А. А. Коршак, А. М. Шаммазов. – Уфа : ДизайнПолиграфСервис, – 658 с. : ил.