

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.5.017, 519.711.3

doi: 10.30987/2658-6436-2023-4-18-27

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ДРОССЕЛИРОВАНИЕМ

Виктор Александрович Хандожко<sup>1✉</sup>, Виталий Павлович Матлахов<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

<sup>1</sup> vichandozhko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>

<sup>2</sup> jed80@mail.ru

**Аннотация.** Целью работы является разработка математической модели технологического участка магистрального трубопровода, которая отражает основные гидравлические процессы в трубопроводе:  $Q$ - $H$ -характеристики напорных и магистральных насосных агрегатов, схемы их включения, характеристики электроприводной части, характеристики линейной части (длина, диаметр, толщина трубопровода), запорной линейной арматуры, дросселирующих заслонок, включая частотный преобразователь, электродвигатель с редуктором и гидравлическую часть (расходная характеристика). Задачей является разработка математической модели технологического участка магистрального трубопровода для дальнейшего использования в составе имитационного стенда системы автоматического регулирования давления (САРД). Методы исследования: использованы метод системного анализа, техническая гидравлика, математическое моделирование работы участка магистрального нефтепровода с учетом включения и выключения магистральных насосных агрегатов и изменения степени открытия узла дросселирования. Результаты исследования: разработанная математическая модель технологического участка магистрального трубопровода учитывает основные гидравлические процессы и может быть использована в программном обеспечении имитатора для систем автоматического регулирования давления. Новизна работы: состоит в создании математической модели технологического участка магистрального трубопровода методом дросселирования, адаптированной для работы в реальном времени для программируемого логического контроллера имитатора. Выводы: Предлагаемая математическая модель технологического участка магистрального трубопровода с регулированием методом дросселирования имеет некоторые допущения, необходимые для работы программного обеспечения в реальном времени и отражает основные гидравлические процессы, протекающие в нефтепроводе. Успешно моделируются переключения магистральных насосных агрегатов и регулирующей арматуры. Результаты моделирования могут быть использованы в программном обеспечении для программно-технического комплекса (ПТК) имитатора испытания автоматики и ПТК настройки САРД.

**Ключевые слова:** математическая модель магистрального трубопровода, имитация, система управления

**Для цитирования:** Хандожко В.А., Матлахов В.П. Математическая модель технологического участка магистрального трубопровода с регулированием дросселированием // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №4 (22). С. 18-27. doi: 10.30987/2658-6436-2023-4-18-27.

Original article

Open Access Article

## MATHEMATICAL MODEL OF THE MAIN PIPELINE TECHNOLOGICAL SECTION WITH THROTTLING CONTROL

Viktor A. Khandozhko<sup>1✉</sup>, Vitaly P. Matlakhov<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> vichandozhko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>

<sup>2</sup> jed80@mail.ru

**Abstract.** The aim of the work is to develop a mathematical model of the technological section of the main pipeline, which reflects the main hydraulic processes in the pipeline, namely  $Q$ - $H$  characteristics of pressure and main pumping units, their connection diagrams, characteristics of the electric drive part, characteristics of the linear part (length,

diameter, thickness of the pipeline), shut-off linear valves, throttling valves, including a frequency converter, an electric motor with a gearbox and a hydraulic part (flow characteristic). The task is to develop a mathematical model of the main pipeline technological section for further use as part of a simulation stand for an automatic pressure control system (APCS). Research methods are used such as the system analysis method, technical hydraulics, mathematical modelling of operating the main oil pipeline section, considering the switch on and off of the main pumping units and changes in the opening degree of the throttling unit. The research results state that the developed mathematical model of the main pipeline technological section takes into account the basic hydraulic processes and can be used in the simulator software for automatic pressure control systems. The novelty of the work consists in building a mathematical model of the main pipeline technological section with throttling control, adapted for real-time operation for the simulator programmable logic controller. The paper findings state that the proposed mathematical model of the main pipeline technological section with throttling control has some assumptions necessary for the software to operate in real time and reflects the main hydraulic processes occurring in the oil pipeline. Switching the main pumping units and control valves is successfully modelled. The simulation results can be used in the computer program for the software and hardware complex (SHC) of the automation testing simulator and the SHC for setting up the APCS.

**Keywords:** mathematical model of the main pipeline, simulation, control system

**For citation:** Khandozhko V.A., Matlakhov V.P. Mathematical Model of the Main Pipeline Technological Section with Throttling Control. Automation and modeling in design and management, 2023, no. 4 (22). pp. 18-27. doi: 10.30987/2658-6436-2023-4-18-27.

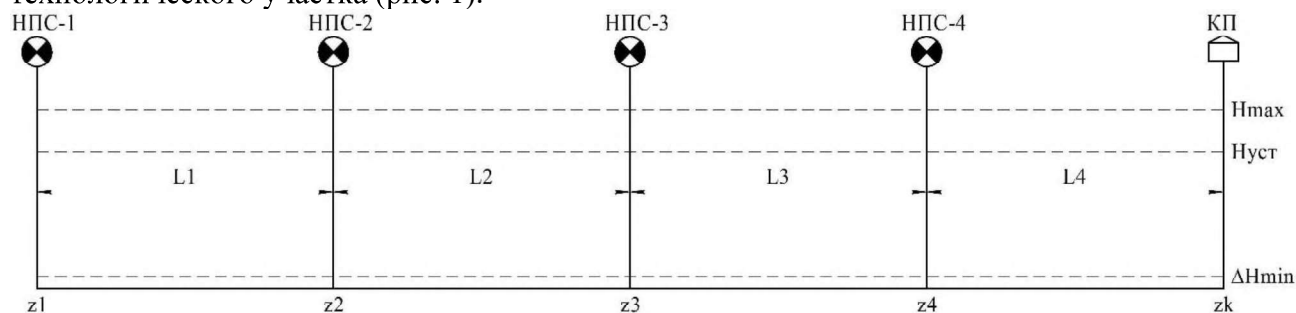
## Введение

Регулирование давления в магистральном нефтепроводе обеспечивает поддержание минимально допустимого давления (подпора) на входе в магистральную насосную станцию (МНС) и максимального давления (напора) на выходе нефтеперекачивающей станции (НПС) [2]:

$$\begin{cases} \Delta H_i \geq \Delta H_{\min i} \\ \Delta H_{\text{НПС } i} \leq H_{\text{НПС } \max i} \end{cases} \quad (1)$$

где  $i$  – индекс НПС;  $\Delta H_i$  – фактический подпор на входе МНС, м;  $H_{\text{НПС } i}$  – фактический напор на выходе НПС, м;  $\Delta H_{\min i}$  – разрешенное значение минимального подпора (кавитационный запас), м;  $H_{\text{НПС } \max i}$  – разрешенное значение максимального напора на выходе  $i$ -й НПС, м.

В установившемся режиме течения нефти выполнение условия (1) обеспечивается за счет схемы расстановки НПС по длине нефтепровода. При нестационарном течении это выполняет САРД на каждой НПС. Давление регулируется на протяжении всего технологического участка (рис. 1).



**Рис. 1. Расчетная схема нефтепровода:**

НПС-1 – НПС-4 – нефтеперекачивающие станции; КП – конечный пункт; L1 – L4 – расстояния между смежными НПС; z1 – z4 – геодезические отметки НПС

**Fig. 1. Oil pipeline design diagram:**

PS-1 – PS-4 – oil pumping stations; CP – final point; L1 – L4 – distances between adjacent PSs; z1 – z4 – geodetic marks of the NPS

При регулировании методом дросселирования на каждой НПС установлена регулирующая заслонка, обычно с резервированием, которая полностью открыта при установившемся течении нефти и дросселирует поток при отклонении давления от уставки  $H_{уст}$ .

Алгоритмы САРД используют ПИД-регулирование. Количество настраиваемых параметров САРД достигает 50. Процесс их настройки для каждой НПС индивидуален и может занимать от несколько часов до нескольких дней. Применение ПТК имитатора позволяет сократить время ввода САРД в опытную эксплуатацию и является обязательным требованием ПАО «Транснефть» как при сдаче автоматики интеграторами, так и при дальнейшей подготовке персонала, ответственного за эксплуатацию и настройку параметров САРД (например, при смене режимов работы нефтепровода). Таким образом, разработка математической модели трубопровода для программного обеспечения ПТК имитатора является актуальной задачей [1, 3].

### Описание математической модели

*Общепринятая математическая модель.* Если по трассе отсутствуют сбросы и подкачки, то в общем виде уравнение баланса напоров для каждого перегона на рис. 1 имеет вид [4, 5]:

$$\begin{cases} h_{п1} + \sum_{j=1}^m (\varphi_{1j} \cdot (a_{1j} - b'_{1j} \cdot Q^2)) = 1,02 \cdot i(Q) \cdot L_1 + (z_2 - z_1) + h_{п2}, \\ h_{п2} + \sum_{j=1}^m (\varphi_{2j} \cdot (a_{2j} - b'_{2j} \cdot Q^2)) = 1,02 \cdot i(Q) \cdot L_2 + (z_3 - z_2) + h_{п3}, \\ h_{п3} + \sum_{j=1}^m (\varphi_{3j} \cdot (a_{3j} - b'_{3j} \cdot Q^2)) = 1,02 \cdot i(Q) \cdot L_3 + (z_4 - z_3) + h_{п4}, \\ h_{п4} + \sum_{j=1}^m (\varphi_{4j} \cdot (a_{4j} - b'_{4j} \cdot Q^2)) = 1,02 \cdot i(Q) \cdot L_4 + (z_k - z_4) + h_{ост}. \end{cases} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) приняты следующие обозначения:  $h_{п1}, h_{п2}, h_{п3}, h_{п4}$  – подпоры (кавитационный запас) на НПС-1, НПС-2, НПС-3 и НПС-4 соответственно;  $m$  – число последовательно включенных магистральных насосных агрегатов (МНА);  $\varphi_{ij}$  – коэффициент матрицы состояния МНА ( $\varphi_{ij} = 1$  при работающем МНА и  $\varphi_{ij} = 0$  при остановленном МНА);  $a_{ij}, b_{ij}$  – константы напорной характеристики МНА ( $b'_{ij} = 3600 \cdot b_{ij}$ );  $L_i$  – длины прогонов между НПС;  $z_i$  – геодезические отметки  $i$ -й НПС;  $h_{ост}$  – остаточный напор для заполнения резервуарного парка КП.

В системе уравнений (1) четыре неизвестных: расход  $Q$  и подпоры перед промежуточными НПС  $h_{п2}, h_{п3}$  и  $h_{п4}$ . Сложив сначала правые части уравнений, а затем – левые, получают уравнения баланса напора для всего трубопровода:

$$h_{п1} + \sum_{i=1}^{N_{ст}} \sum_{j=1}^m (\varphi_{ij} \cdot (a_{ij} - b'_{ij} \cdot Q^2)) = 1,02 \cdot i(Q) \cdot L_p + \Delta z + h_{ост}. \quad (2)$$

После выражения расхода из уравнения (2) получают:

$$Q = \sqrt{\frac{a_{п1} + \sum_{i=1}^{N_{ст}} \sum_{j=1}^m \varphi_{ij} \cdot a_{ij} - \Delta z - h_{ост}}{8,16 \cdot \frac{\lambda \cdot L_p}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} + \frac{b_{п1}}{n^2} + \sum_{i=1}^{N_{ст}} \sum_{j=1}^m \varphi_{ij} \cdot b_{ij}}}, \quad (3)$$

где  $N_{ст}$  – количество НПС на участке;  $n$  – число параллельно работающих подпорных насосных агрегатов (ПНА);  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $D$  – внутренний диаметр трубопровода.

*Уточненная математическая модель.* Как видно из уравнения (3), оно не учитывает гидравлические сопротивления в виде дросселирующих заслонок [6]. Эти заслонки реализуют алгоритм работы системы автоматического регулирования давления в нефтепроводе при нестационарных течениях. В качестве примера в модели рассмотрены характеристики заслонки модели Vanessa 3000 с пропускной способностью, показанной на рис. 2.

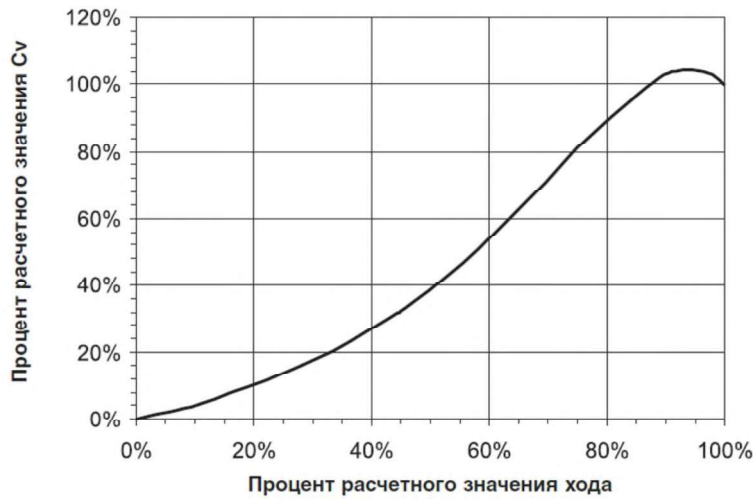


Рис. 2. Зависимость относительной пропускной способности от степени открытия заслонки  
 Fig. 2. Dependence of relative throughput on the degree of damper opening

Функция перепада давления на заслонке  $\Delta p_{др}(Q)$ , кгс/см<sup>2</sup>, определяется по зависимости вида:

$$\Delta p_{др}(Q) = \left(\frac{Q}{K_v}\right)^2 \cdot (\rho \cdot 10^{-3}), \quad (4)$$

где  $Q$  – расход, м<sup>3</sup>/ч;  $K_v$  – пропускная способность заслонки, м<sup>3</sup>/ч;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Пропускная способность  $K_v$  в свою очередь является функцией степени открытия  $q$  заслонки:  $K_v = f(q)$ . Данную функцию удобно задавать в табличном виде на основе интерполированного кубического сплайна  $fit(q)$ . Пропускная способность зависит от условной пропускной способности  $K_{v0}$ :

$$K_v(q) = \frac{fit(q)}{100} \cdot K_{v0}. \quad (5)$$

Для группы из двух параллельных заслонок (основной и резервной) со степенями открытия  $q_1$  и  $q_2$  функцию перепада давления на заслонке, кгс/см<sup>2</sup>, будем определять по формуле:

$$\Delta p_{др}(Q, q_1, q_2) = \left(\frac{Q}{\left(\frac{fit(q_1)}{100} + \frac{fit(q_2)}{100}\right) \cdot K_{v0}}\right)^2 \cdot (\rho \cdot 10^{-3}). \quad (6)$$

Функция перепада напора на заслонке  $h_{др}(Q, q_1, q_2)$ , м, имеет вид:

$$h_{др}(Q, q_1, q_2) = \frac{10^5 \cdot \Delta p_{др}(Q, q_1, q_2)}{\rho \cdot g} = \frac{10^2}{g} \cdot \frac{Q^2}{\sum_{k=1}^2 K_{vk}^2(q_{ik})}, \quad (7)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $k$  – индекс заслонки.

Перепишем систему уравнений с учетом формул (2) – (7):

$$\begin{cases} \Delta H_1 + H_{ст1} = H_{1-2} + (z_2 - z_1) + \Delta H_2, \\ \Delta H_2 + H_{ст2} = H_{2-3} + (z_3 - z_2) + \Delta H_3, \\ \Delta H_3 + H_{ст3} = H_{3-4} + (z_4 - z_3) + \Delta H_4, \\ \Delta H_4 + H_{ст4} = H_{4-кп} + (z_k - z_3) + \Delta H_{кп}. \end{cases} \quad (8)$$

Стационарный напор  $H_{сти}$  определяется по формуле:

$$H_{сти} = \sum_{j=1}^m \left( \varphi_{ij} \cdot (a_{ij} - b'_{ij} \cdot Q^2) \right) - \frac{10^2}{g} \cdot \frac{Q^2}{\sum_{k=1}^2 K_{vk}^2(q_{ik})}. \quad (9)$$

После суммирования слагаемых вначале в левой части системы (8), а затем – правой, получим:

$$\begin{aligned} h_{п}(Q) + H_{ст}(Q, q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}, q_{31}, q_{32}, q_{41}, q_{42}) = \\ = 1,02 \cdot i(Q) \cdot L_p + (z_k - z_1) + h_{ост}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда выражение (3) можно переписать в следующем виде:

$$Q = \sqrt{\frac{a_n + \sum_{i=1}^{N_{CT}} \sum_{j=1}^m \varphi_{ij} \cdot a_{ij} - \Delta z - h_{ост}}{8,16 \cdot \frac{\lambda \cdot L_p}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} + \frac{b_n}{n^2} + \sum_{i=1}^{N_{CT}} (\sum_{j=1}^m \varphi_{ij} \cdot b_{ij}) + \frac{10^2}{g \cdot \sum_{k=1}^2 K_{vk}^2 (q_{ik})}}}. \quad (11)$$

### Численное моделирование

В качестве практического примера рассмотрим участок магистрального нефтепровода, параметры которого указаны в табл. 1.

Таблица 1

#### Исходные параметры

Table 1

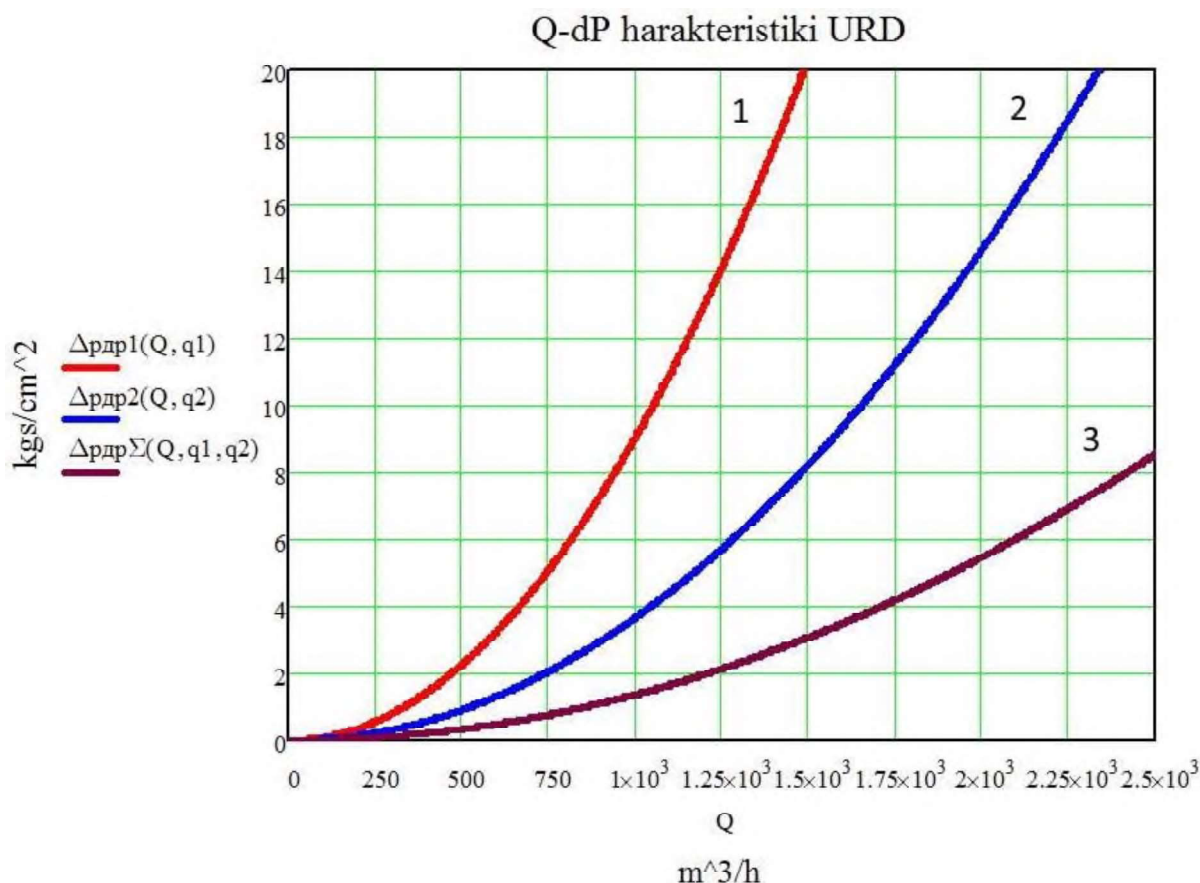
#### Initial parameters

Наименование	Обозначение	Значение	Размерность
Характеристики линейной части			
Годовая производительность	$G_c$	15	млн.т/год
Протяженности трассы	$L_p$	500	км
Коэффициент неравномерности перекачки	$k_{ин}$	1,05	—
Расчетное число рабочих дней в году	$N_p$	354	—
Наружный диаметр	$D_{нар}$	720	мм
Толщина стенки	$\delta$	10	мм
Абсолютная шероховатость	$\Delta E$	0,2	мм
Высотная отметка НПС-1	$z1$	90	м
Высотная отметка НПС-2	$z2$	30	м
Высотная отметка НПС-3	$z3$	150	м
Высотная отметка НПС-4	$z4$	40	м
Высотная отметка КП	$zk$	80	м
Конечный подпор	$hk$	30	м
Характеристики дроссельной заслонки			
Условный диаметр	$D_N$	250	мм
Условная пропускная способность	$K_{v0}$	2217	м <sup>3</sup> /ч
Характеристики МНА			
Номинальная подача	$Q_N$	2500	м <sup>3</sup> /ч
Номинальный напор	$H_N$	230	м
Число МНА в работе НПС-1	$\varphi_1$	2	—
Число МНА в работе НПС-2	$\varphi_2$	2	—
Число МНА в работе НПС-3	$\varphi_3$	2	—
Число МНА в работе НПС-4	$\varphi_4$	2	—
Характеристики перекачиваемой среды			
Плотность	$\rho$	870	кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент кинематической вязкости	$\nu$	9	сСт

Для заданных характеристик процесса был рассчитан тип МНА НМ2500-230. Условие обеспечения заданной эквивалентной (две заслонки) пропускной способности имеет вид:

$$K_{vmin} \leq K_v \leq K_{vmax} \quad (12)$$

Данному условию удовлетворяют заслонки с пропускной способностью 1310 и 2217 кг/м<sup>3</sup>. Расходные характеристики выбранной заслонки при разных степенях открытия показаны на рис. 3.



**Рис. 3. Зависимость перепада давления на заслонке от расхода:**  
 1 – одна заслонка  $q_1 = 25\%$ ; 2 – одна заслонка  $q_2 = 35\%$ ; 3 – две заслонки  
**Fig. 3. Dependence of pressure drop across the throttle on flow:**  
 1 – one throttle  $q_1 = 25\%$ ; 2 – one throttle  $q_2 = 35\%$ ; 3 – two throttles

Далее были рассчитаны недостающие параметры трубопровода. Для рассчитанного трубопровода определены расход, коэффициент сопротивления, гидроклон и потери на линейной части трубопровода.

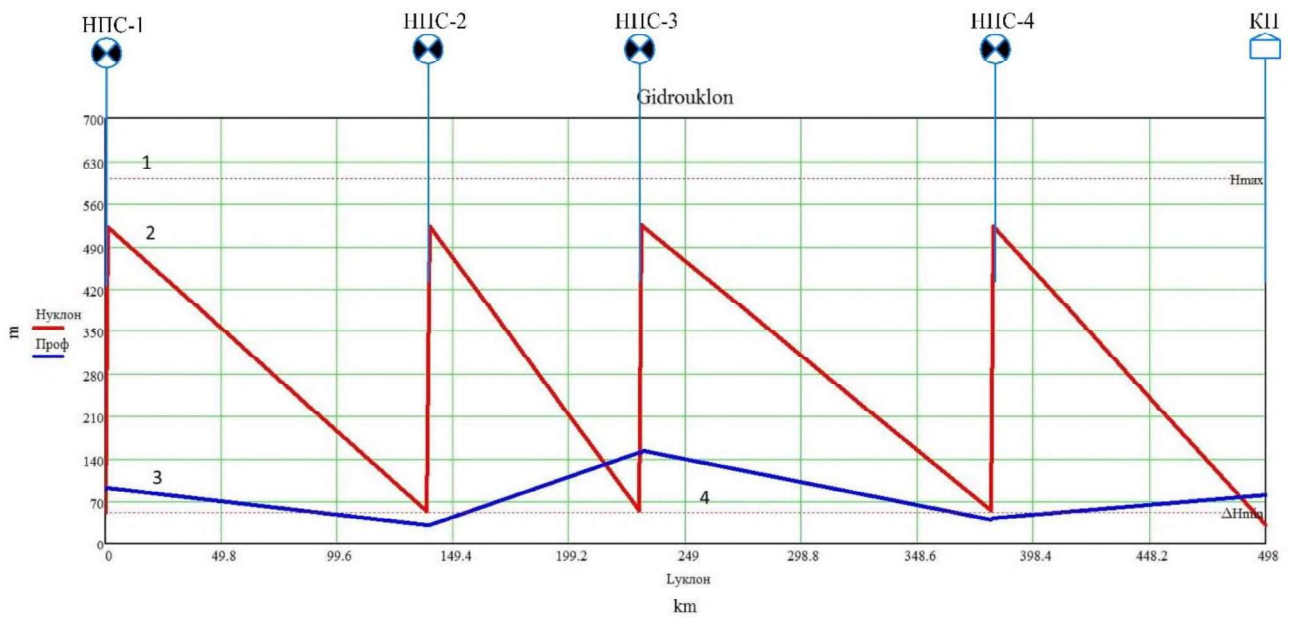
При работе участка из 4-х НПС по схеме 2-2-2-2 располагаемый напор на всем участке составил  $H_{расп} = 2070$  м; расход без дросселирования  $Q_{расп} = 2445$  м<sup>3</sup>/ч.

Для определения расстояний между НПС применяется формула:

$$L_{i,i+1} = \frac{\frac{H_{потр}(Q_{расп})}{N_{ст}} - (z_{i+1} - z_i + \Delta H_{min i})}{1.02 \cdot i(Q_{расп}) \cdot 10^3}. \quad (3)$$

Для заданных геодезических отметок были рассчитаны расстояния между НПС на участке:  $L_{1-2} = 138$  км;  $L_{2-3} = 91$  км;  $L_{3-4} = 151$  км;  $L_{4-КП} = 118$  км.

Результаты моделирования по распределению напоров (давлений) вдоль магистрального трубопровода представлены в виде эпюры гидроклонов (рис. 4). При этом были приняты допущения о постоянстве допустимого рабочего давления вдоль трубопровода и монотонности профиля трассы.

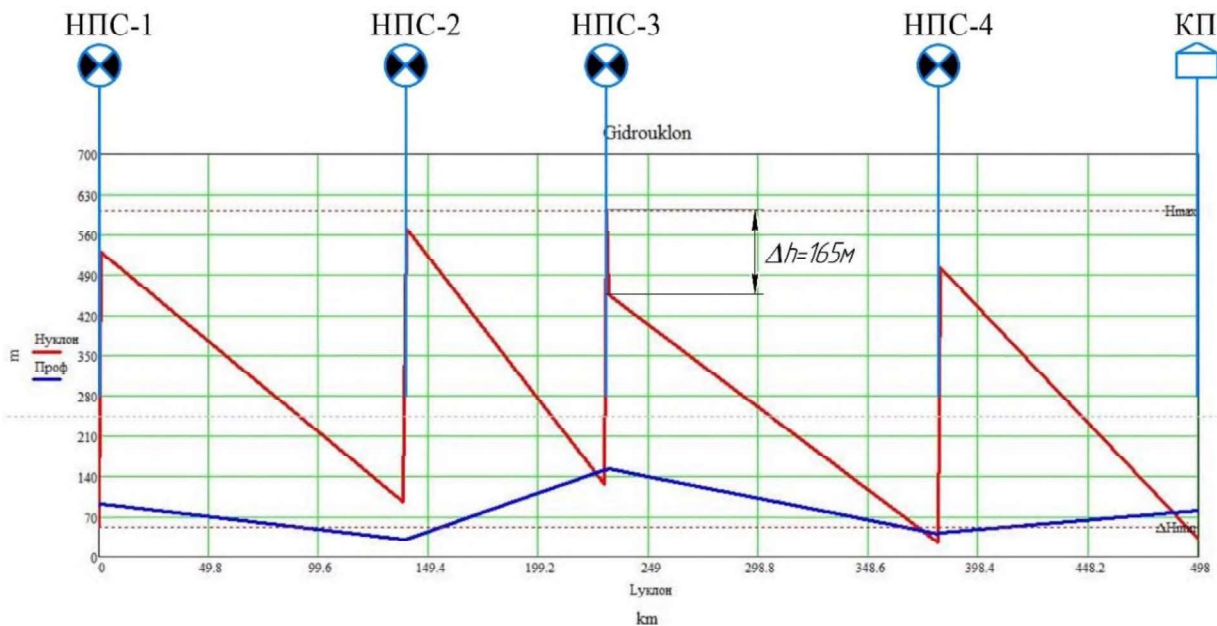


**Рис. 4. Эпюра распределения напоров проектная:**  
 1 – максимально допустимый напор; 2 – линия гидроуклона; 3 – профиль трассы;  
 4 – минимально допустимый напор

**Fig. 4. Design pressure distribution diagram:**

1 – maximum permissible pressure; 2 – hydraulic slope line; 3 – route profile; 4 – minimum permissible pressure

Для описанных условий проведено моделирование гидроуклона при дросселировании на НПС-3 (рис. 5).



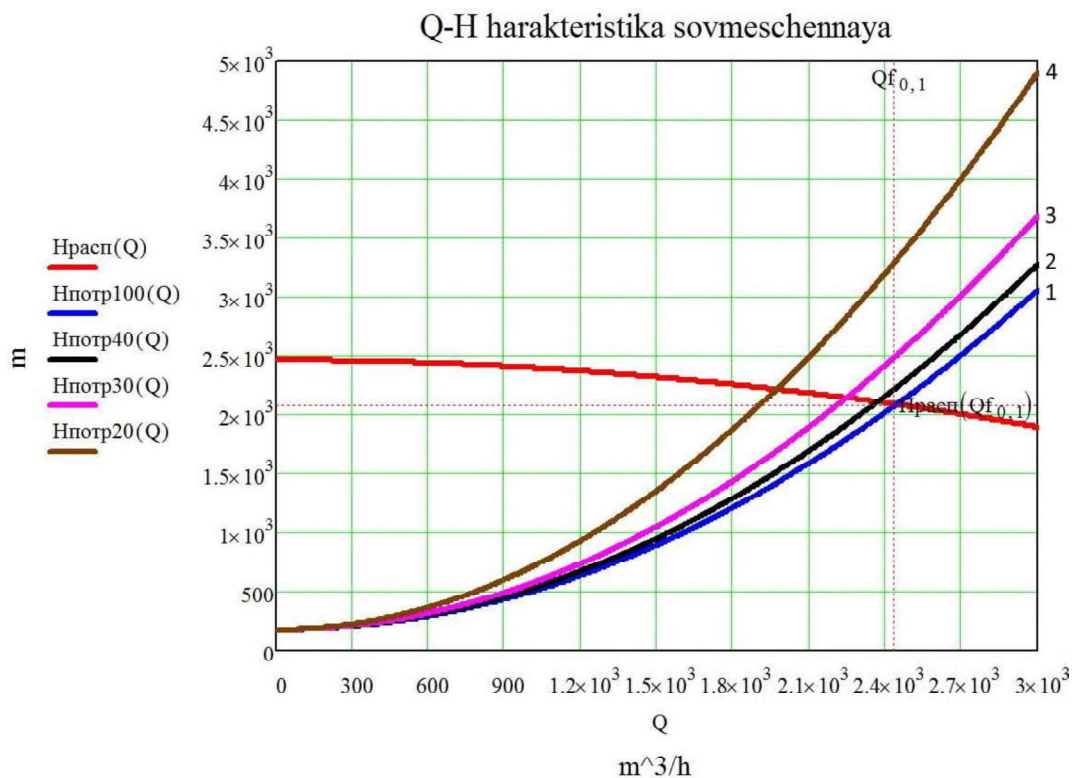
**Рис. 5. Эпюра распределения напоров при дросселировании**  
**Fig. 5. Diagram of pressure distribution during throttling**

Из графика видно качественное соответствие физической картины моделируемым значениям. Так, на эпюре видно падение напора на заслонке  $\Delta h = 165$  м при степени открытия  $q_1 = q_2 = 25$  %. При этом давление на входе НПС-3 повышается до 126 м, в коллекторе – увеличивается до 602 м, что соответствует предельно максимальному значению по условию прочности трубопровода. На выходе напор снижается до 455 м. Значения напоров на входе и выходе станций выше по потоку (НПС-1 и НПС-2) повышаются. Давления на входе НПС-4 и КП снижаются ниже предельно минимального напора, создавая условия возникновения



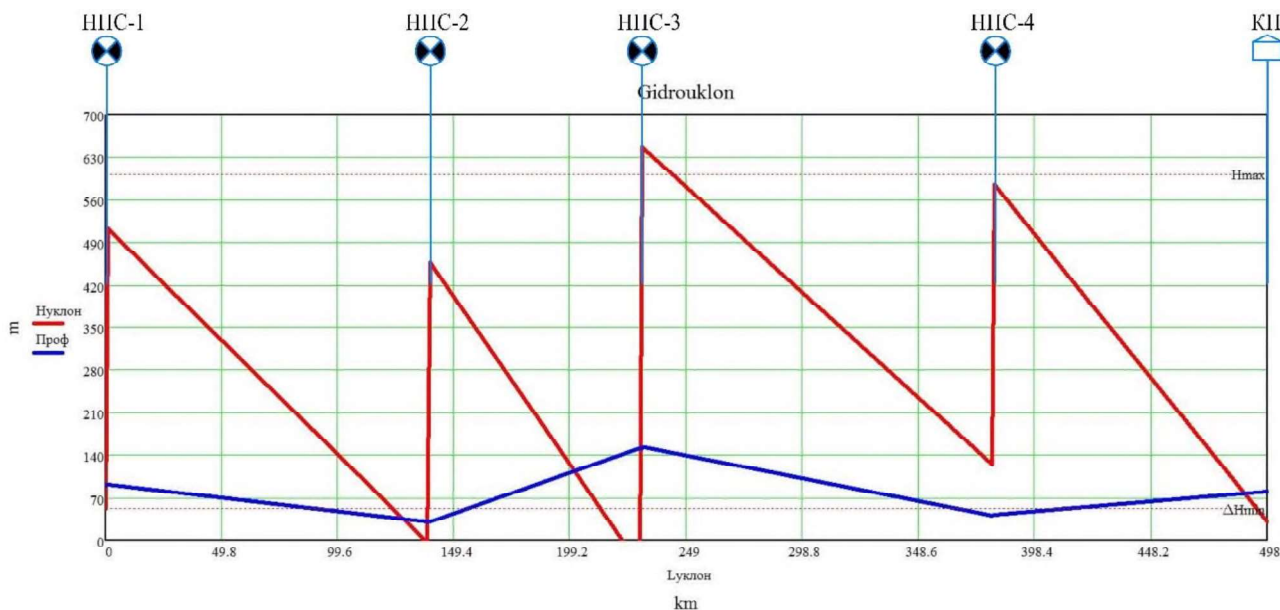
кавитации и остановку МНА. Для удержания участка в работе по условию выхода за предельные напоры необходима САРД.

Напорные характеристики, построенные для участка нефтепровода, при условии одинакового положения заслонок на всех НПС показаны на рис. 6.



**Рис. 6. Напорные характеристики для участка нефтепровода:**  
 1 –  $q = 100\%$ ; 2 –  $q = 40\%$ ; 3 –  $q = 30\%$ ; 4 –  $q = 20\%$   
**Fig. 6. Pressure characteristics for the oil pipeline section:**  
 1 –  $q = 100\%$ ; 2 –  $q = 40\%$ ; 3 –  $q = 30\%$ ; 4 –  $q = 20\%$

Работа участка при включении 3-го МНА на НПС-3 (по схеме 2-2-3-2) показана на рис. 7.

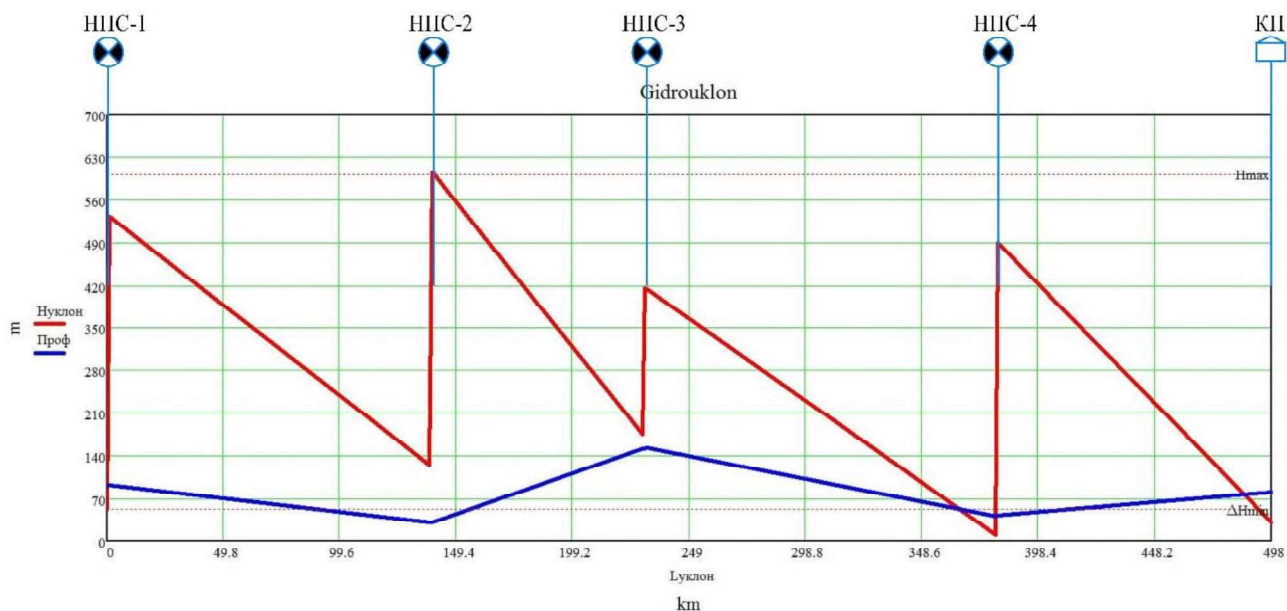


**Рис. 7. Эпюра распределения напоров при включении 3-го МНА на НПС-3**  
**Fig. 7. Diagram of pressure distribution when the 3rd MPA is turned on at PS-3**



Как видно из рис. 7, включения 3-го МНА на НПС-3 при том же количестве работающих МНА на остальных станциях делает работу участка невозможной без регулирования давления. Так, на входе НПС-3 напор не просто ниже предела кавитации, но и недостаточен для обеспечения работы МНА в принципе. В то же время напор на выходе НПС-3 превышает ограничение по прочности трубопровода.

Работа участка при отключении 2-го МНА на НПС-3 (по схеме 2-2-1-2) показана на рис. 8.



**Рис. 8. Эпюра распределения напоров при отключении 2-го МНА на НПС-3**  
**Fig. 8. Diagram of pressure distribution when the 2nd MPA is disconnected at PS-3**

Как видно из рис.8, отключение 2-го МНА на НПС-3 увеличивает напор на входе НПС-3 и уменьшает напор на входе НПС-4 ниже кавитационного запаса, что объясняется уменьшением расхода на участке. Одновременно с этим напор на выходе НПС-2 повышается выше предела прочности трубопровода.

## Результаты

Разработанная математическая модель технологического участка магистрального трубопровода отражает основные гидравлические процессы в трубопроводе с учетом включения и выключения МНА и изменения степени открытия узла дросселирования. Данная математическая модель позволяет исследовать изменение давления, расхода и гидроуклона в трубопроводе при переключениях технологического оборудования нефтепроводного транспорта (включение/отключение МНА, изменении степени открытия заслонки). Результаты моделирования показывают сходимость с реальными измерениями на объектах нефтепроводного транспорта.

Кроме того, эта модель адаптирована для работы в реальном времени для программируемого логического контроллера имитатора, что позволяет использовать результаты моделирования в программном обеспечении для программно-технического комплекса (ПТК) имитатора испытания автоматики и ПТК настройки САРД.

### Список источников:

1. Матлахов В.П., Хандожко В.А., Агеенко А.В. Автоматизация стенда системы контроля уровня и температуры резервуарного парка // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2023. – №1. – С. 4-11.

### References:

1. Matlakhov V.P., Khandozhko V.A., Ageenko A.V. Automating the Stand of the Level and Temperature Control System of the Tank Farms. Automation and Modelling in Design and Management. 2023;1:4-11.

2. Гаврилов Е.С., Хвостов В.А. Система автоматического регулирования давления в магистральном трубопроводе с адаптивным модальным регулятором // САПР и моделирование в современной электронике. Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 153-155.

3. Барабанов Д.В. Хвостов В.А. Частотно-регулируемый электропривод насоса магистрального нефтепровода с управлением по положению регулирующей заслонки // САПР и моделирование в современной электронике. Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 146-148.

4. Есаулов А.О., Текшева И.В. Моделирование систем управления нефтепроводами // Трубопроводный транспорт нефти. – 2010. №8. – С. 63-68.

5. Цхадая Н.Д., Тетеревлева Е.В., Ягубов З.Х. Математическая модель участка магистрального газопровода для задач имитации и управления // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – №3. – С. 155-163.

6. Усовершенствованная математическая модель участка магистрального трубопровода с лупингом / Р.А. Шестаков, К.С. Резанов, Ю.С. Матвеева, И.М. Ванчугов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – №2. – С. 123-131.

#### Информация об авторах:

##### **Хандожко Виктор Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического университета, <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>

##### **Матлахов Виталий Павлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического университета

2. Gavrilov ES, Khvostov VA. System of Automatic Pressure Control in the Main Pipeline With an Adaptive Modal Regulator. In: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference: CAD and Simulating in Modern Electronics; 2020. p. 153-155.

3. Barabanov DV, Khvostov VA. Frequency-Controlled Electric Drive of the Main Oil Pipeline Pump With Control by the Position of the Control Valve. In: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference: CAD and Simulating in Modern Electronics; 2020. p. 146-148.

4. Esaulov A.O., Teksheva I.V. Simulation of Oil Pipeline Control Systems. Pipeline Oil Transport. 2010;8:63-68.

5. Tskhadaya N.D., Teterevleva E.V., Yagubov Z.Kh. Mathematical Model of Main Gas Pipeline Section for Simulation and Control. Oil and Gas Business [Internet]. 2012;3:155-163.

6. Shestakov R.A., Rezanov K.S., Matveeva Yu.S., Vanchugov I.M. Improved Mathematical Model of the Main Pipeline with Looping. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022;333(2):123-131.

#### Information about the authors:

##### **Khandozhko Viktor Alexandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Automated Technological Systems” of Bryansk State Technical University, <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>

##### **Matlakhov Vitaly Pavlovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Automated Technological Systems” of Bryansk State Technical University

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья поступила в редакцию 04.10.2023; одобрена после рецензирования 15.11.2023; принята к публикации 16.11.2023.**

**The article was submitted 26.10.2023; approved after reviewing 15.11.2023; accepted for publication 16.11.2023.**

**Рецензент – Коськин А.В., доктор технических наук, доцент, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева.**

**Reviewer – Koskin A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev.**