

УДК 621.6-52; 622.69

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ  
НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ**

**DEFINITION OF CALCULATION DISTURBANCE FOR AUTOMATIC  
CONTROL SYSTEMS PRESSURE PUMPING STATIONS TRUNK OIL  
PIPELINES**

**Бархатов А.Ф., Вязунов Е.В.**

**ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация**

**A.F. Barkhatov, E.V. Vyazunov**

**FSBEI NPE National Research Tomsk Polytechnic University,  
Tomsk, the Russian Federation**

**e-mail: barkhatov-alex@yandex.ru**

**Аннотация.** Система автоматического регулирования (САР) давления перекачивающей станции должна обеспечивать отработку расчетного возмущения, связанного с отключением одного насоса на следующей нефтеперекачивающей станции (НПС) или пуска одного насоса на предыдущей НПС [1,2].

Расчетное возмущение возникает как результат нескольких процессов:

- возникновение исходного возмущения, т.е. образование волны расхода и давления на станции, где произошло отключение или пуск насоса;

- распространение этого возмущения по участку нефтепровода между точкой возникновения возмущения и станцией, где находится САР давления, и его затухание по мере распространения, т.е. уменьшение

амплитуды и крутизны фронта. Волна, дошедшая до станции с САР давления, называется набегающей волной;

- взаимодействие набегающей волны с насосной станцией.

Система регулирования должна обладать таким быстродействием, чтобы создаваемая ею волна давления имела противоположный знак и крутизну фронта не меньше крутизны фронта расчетного возмущения.

В настоящей работе получено выражение для определения исходного возмущения, возникающего при отключении насоса на промежуточной перекачивающей станции без резервуарного парка. Напорная характеристика насосов аппроксимируется полным полиномом второго порядка (все коэффициенты полинома отличны от нуля).

Для расчета затухания крутизны фронта волн определен коэффициент линеаризации уравнений неустановившегося движения жидкости через значение производной гидравлического уклона по расходу. Для определения минимального затухания длина участка принята равной 50 км.

В результате взаимодействия набегающей волны с насосной станцией образуется отраженная от станции волна давления и расхода, движущаяся по трубопроводу в направлении, противоположном направлению движения набегающей волны. Взаимосвязь волн давления и расхода определяется формулой Жуковского. Получено уравнение для определения крутизны фронта отраженной волны при известной крутизне фронта волны давления с учетом нелинейности напорной характеристики станции. Выполнены расчеты по определению расчетного возмущения для нефтепроводов DN 500 – 1200 мм.

**Abstract.** The automatic control system (ACS) pressure pumping station must ensure testing of the estimated disturbance associated with the shutdown of the pump at the next pump station (PS), or start one pump at the previous PS [1,2].

Estimated disturbance occurs as the result of several processes:

- the occurrence of the initial perturbation, education waves flow and pressure at the station, where there was a start-up or shutdown of the pump;
- the spread of this disturbance through the pipeline section between the point of origin of the perturbation and the station where the ACS pressure and attenuation as we move, reducing the amplitude and rise time. The wave, which reached ACS stantsiis pressure is called the incoming wave;
- the interaction of the incident wave with a pumping station.

The regulatory system should have such a speed that it creates a pressure wave had the opposite sign of the slope of the front and not less than the rise time estimated disturbance.

In this paper, the expression for determining the initial disturbance that occurs when the pump is turned off at an intermediate transfer station without the tank farm. Pressure pump performance approximated full second-order polynomial (all the coefficients are different from zero).

To calculate the attenuation slope coefficient of wave front defined linearization of unsteady flow of fluid through the hydraulic gradient value of the derivative of consumption. To determine the minimum length of the decay is taken to be 50 km.

The interaction of the incoming wave is formed with a pumping station to the station reflected pressure wave and flow, moving along the conduit in a direction opposite to the direction of motion of the oncoming wave. The relationship of the pressure waves and flow rate determined by the formula «Zhukovsky». The equation for determining the slope of the front of the reflected wave at a certain steepness of the wave front the pressure considering the nonlinearity of the discharge characteristics of the station. Calculations to determine the calculated perturbations for pipeline DN 500 - 1200 mm.

**Ключевые слова:** расчетное возмущение, исходное возмущение, крутизна фронта волны, система автоматического регулирования коэффициент линеаризации, напорная характеристика насосов, формула Жуковского.

**Key words:** calculated disturbance, initial disturbance, the slope of the wave front, automatic control system, coefficient of linearization, the formula «Zhukovsky».

Наиболее распространенное возмущение на магистральном нефтепроводе – отключение или пуск одного насосного агрегата на НПС [3]. Основным требованием к САР давления на НПС является отработка возмущения, вызванного отключением одного насоса на следующей НПС или пуска одного насоса на предыдущей НПС [1,2] – исходного возмущения. Распространяясь по трубопроводу, исходное возмущение затухает, т.е. его амплитуда и крутизна фронта по абсолютной величине уменьшаются. Достигая соседней насосной станции, набегающая волна взаимодействует с ней. В результате взаимодействия часть волны отражается от станции и движется в направлении противоположном набегающей волне. Сумма набегающей и отраженных волн представляет собой расчетное возмущение, которое должна отработать система регулирования. То есть САР должна создать волну с крутизной фронта по абсолютной величине не меньше крутизны фронта набегающей волны. Таким образом, чтобы определить расчетное возмущение необходимо:

- 1) рассчитать исходное возмущение;
- 2) определить затухание исходного возмущения при прохождении участка нефтепровода;
- 3) определить, как набегающая волна взаимодействует с насосной станцией, т.е. найти величину отраженной волны.

Для последующих расчётов введём следующие обозначения:

$N_0$	– мощность насоса до отключения;
$\omega_0$	– угловая частота вращения агрегата до отключения;
$J$	– момент инерции насосного агрегата;
$Q_0$	– номинальная подача насосов (расход в трубопроводе);
$Q$	– подача насосов (расход в трубопроводе);

$\Delta Q$	– изменение подачи насосов (изменение расхода в трубопроводе);
$i_0$	– гидравлический уклон на участке трубопровода при расходе $Q_0$ ;
$k$	– коэффициент линеаризации напорной характеристики, характеризующий крутизну напорной характеристики насосной станции без резервуарного парка и подпорных насосов;
$k_p$	– коэффициент линеаризации напорной характеристики насосной станции с резервуарным парком и подпорными насосами;
$P(H)$	– изменение давления (напора) в переходном процессе;
$H_{ст}$	– напор станции;
$P_{вз}(H_{вз})$	– крутизна фронта набегающей на насосную станцию волны давления (напора);
$Q_{вз}$	– крутизна фронта набегающей на насосную станцию волны расхода;
$P_r(H_r)$	– крутизна фронта отраженной от НПС волны давления (напора);
$Q_r$	– крутизна фронта отраженной от НПС волны расхода;
$c$	– скорость звука в трубопроводе;
$l$	– длина участка нефтепровода между соседними станциями;
$t$	– время;
$\mu$	– коэффициент отражения волны давления от насосной станции в случае линеаризованной характеристики насосной станции;
$\mu_r$	– коэффициент отражения волны давления от насосной станции в случае нелинейной характеристики насосной станции;
$S$	– проходное сечение трубопровода;
$\xi$	– коэффициент линеаризации уравнений неустановившегося движения жидкости, $c^{-1}$ ;
$g$	– ускорение свободного падения;
$m$	– количество последовательно включенных магистральных насосных агрегатов;
$n$	– количество параллельно включенных подпорных насосов на станции с резервуарным парком;
$\rho$	– плотность нефти;
$a_0, a_1, a_2$	– коэффициенты аппроксимации напорной характеристики магистрального насоса полиномом второй степени;
$b_0, b_1, b_2$	– коэффициенты аппроксимации полиномом второго порядка всех включенных подпорных насосов;
$e_0, e_1, e_2$	– коэффициенты аппроксимации полиномом второго порядка напорной характеристики НПС с резервуарным парком и подпорными насосами.

Рассматривается технологический участок магистрального нефтепровода без подкачек, отборов и лупингов по трассе, поэтому в последующих расчетах принимается, что расход в трубопроводе равен подаче насосов. Значения всех величин выражаются в системе СИ, если не оговорено иное. Характеристики нефтепроводов (диаметр, производительность) приняты в соответствии с требованиями [4],

(таблица 1). Характеристики насосов приняты, исходя из того, что они оснащены основными роторами с максимальным внешним диаметром рабочего колеса, номинальная подача которых указана в наименовании типа насосов. На практике могут применяться сменные роторы с номинальными подачами из ряда 0,5, 0,7, 1,25 от номинальной подачи основного ротора, а также с уменьшенным внешним диаметром колеса. В таких случаях по нижеизложенной методике требуется пересчет искомых параметров. В расчетах принято: плотность нефти 850 кг/м<sup>3</sup>, вязкость 25сСт, на магистральной насосной станции три насоса включены последовательно, частота вращения насосов на всех станциях – 3000 об/мин ( $\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$ ).

Таблица 1. Характеристика нефтепроводов

DN, мм	Тип магистрального насоса	$Q_0$ , м <sup>3</sup> /с	$i_0$ , м/км	$\xi \cdot 10^2$ , с <sup>-1</sup>	Коэффициент затухания $\exp(-\frac{\xi \cdot l}{c})$
700	НМ 2500-230	0,69	5,00	2,52	0,31
800	НМ 3600-230	1,00	5,02	2,27	0,34
1000	НМ 7000-210	1,94	5,57	2,01	0,39
1200	НМ 10000-210	2,78	4,37	1,58	0,47

### **Аналитическое представление напорных характеристик насосных станций**

В последующих выкладках для насосных станций без резервуарного парка и подпорных насосов и стаций с резервуарным парком и подпорными насосами используется разное аналитическое представление суммарного напора всех включенных насосов – напорной характеристики станции.

На станции без резервуарного парка при  $m$  последовательно включенных магистральных насосов напорная характеристика станции:

$$H_{cm.}(Q) = m \cdot (a_0 + a_1 \cdot Q + a_2 \cdot Q^2), \quad (1)$$

Напор  $n$  параллельно включенных подпорных насосов равен:

$$b_0 + b_1 \cdot \frac{Q}{n} + b_2 \cdot \frac{Q^2}{n^2}, \quad (2)$$

Напорная характеристика станции с резервуарным парком и подпорными насосами имеет вид:

$$H_{cm.}(Q) = m \cdot a_0 + b_0 + (m \cdot a_1 + \frac{b_1}{n}) \cdot Q + (m \cdot a_2 + \frac{b_2}{n^2}) \cdot Q^2, \text{ или} \quad (3)$$

$$H_{cm.}(Q) = e_0 + e_1 \cdot Q + e_2 \cdot Q^2, \quad (4)$$

где  $e_0 = m \cdot a_0 + b_0$ ;  $e_1 = m \cdot a_1 + \frac{b_1}{n}$ ;  $e_2 = m \cdot a_2 + \frac{b_2}{n^2}$ ;

Коэффициенты линеаризации напорных характеристик станций:

$k = -m \cdot (a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot Q_0)$  – НПС без резервуарного парка;

$k_p = -(e_1 + 2 \cdot e_2 \cdot Q_0)$  – НПС с резервуарным парком.

Производная напора станции по подаче в рабочей части характеристики насосов (выражения  $a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot Q_0$  и  $e_1 + 2 \cdot e_2 \cdot Q_0$ ) – отрицательное число для всех рассматриваемых насосов, поэтому  $k$  и  $k_p$  – положительные числа.

Линеаризованные напорные характеристики имеют вид:

$$H_{cm.}(Q) = H_{cm.}(Q_0) - k \cdot \Delta Q, \quad \text{НПС без резервуарного парка} \quad (5)$$

$$H_{cm.}(Q) = H_{cm.}(Q_0) - k_p \cdot \Delta Q, \quad \text{НПС с резервуарным парком} \quad (5a)$$

Данные по магистральным насосам и результаты расчетов для станций без резервуарного парка приведены в таблице 2.

Данные по подпорным насосам и результаты расчетов для станций с резервуарным парком приведены в таблице 3.

Таблица 2. Характеристика насосных станций без резервуарного парка

DN, мм	Тип насоса	$a_0$ , м	$a_1$ , с/м <sup>2</sup>	$a_2$ , с <sup>2</sup> /м <sup>5</sup>	$k$ , с/м <sup>2</sup>	$N_0$ , кВт	$J$ , кгс·м <sup>2</sup>	$\left. \frac{dP(0,t)}{dt} \right _{t=0}$ , кгс/см <sup>2</sup> /с	$\mu$	$\mu_r$	$\left. \frac{dP(l,t)}{dt} \right _{t=\frac{l}{c}}$ , кгс/см <sup>2</sup> /с
700	НМ 2500-230	273,7	26,3	-127,8	453,60	1589	63,25	3,33	0,60	0,45	1,50
800	НМ 3600-230	291,5	42,8	-106,3	509,40	2265	76,45	3,55	0,59	0,55	1,86
1000	НМ 7000-210	314,0	-7,8	-23,1	293,00	3999	189,75	2,66	0,40	0,52	1,59
1200	НМ 10000-210	332,3	-34,7	-3,6	164,06	5595	211,75	3,40	0,41	0,47	2,34

Таблица 3. Характеристика насосных станций с резервуарным парком

DN, мм	Подпорный насос НПВ	n	$b_0$ , м	$b_1$ , с/м <sup>2</sup>	$b_2$ , с <sup>2</sup> /м <sup>5</sup>	$e_0$ , м	$e_1$ , с/м <sup>2</sup>	$e_2$ , с <sup>2</sup> /м <sup>5</sup>	$k_p$ , с/м <sup>2</sup>	$P_{\text{вз}}$ , кгс/см <sup>2</sup> /с	$Q_{\text{вз}}$ , м <sup>3</sup> /ч	$\mu$	$\mu_r$	$\left. \frac{dP(l,t)}{dt} \right _{t=\frac{l}{c}}$ , кгс/см <sup>2</sup> /с
700	2500-80	1	140,92	20,93	-25,66	917,44	104,86	-454,64	526,58	1,03	162,32	0,50	0,29	1,33
800	3600-90	1	96,37	26,02	-71,28	995,80	139,00	-361,15	583,30	1,20	250,58	0,48	0,47	1,76
1000	3600-90	2	96,37	26,02	-71,28	1063,4	-18,22	-79,86	328,77	1,04	329,97	0,14	0,41	1,47
1200	5000-120	2	121,30	10,60	-42,25	1137,8	-93,74	-17,19	189,24	1,59	742,14	0,17	0,35	2,14



## Использование формулы Жуковского при расчете переходных процессов

При расчете переходных процессов используется формула Жуковского в форме:

$$\Delta H = \pm \frac{c \cdot \Delta Q}{g \cdot S}, \quad (6)$$

где  $\Delta H$  – изменения напора в переходном процессе. Знак плюс используется для определения волн, распространяющихся по потоку, знак минус – для волн, распространяющихся против потока. Указанное соотношение является частным случаем уравнений прямой и обратной характеристик [5], если в них пренебречь потерями напора на трение. Из этого следует, что формула Жуковского дает хорошие результаты при расчете быстропротекающих переходных процессов, когда возмущение охватывает короткий участок трубопровода.

### Расчет исходного возмущения

Данная задача решена в [6]. В этой работе показано, что скорость роста давления на входе станции после отключения одного агрегата имеет максимальное значение в момент отключения ( $t = 0$ ) и уменьшается с увеличением  $t$ . Поэтому требуемое быстродействие САР должно определяться крутизной фронта волны возмущения. В расчетах использовалась аппроксимация напорной характеристики насоса полиномом вида  $H = a_0 + a_2 \cdot Q^2$ . В настоящей работе с целью повышения точности расчетов в отличие от [6] используется аппроксимация напорных характеристик полным (со всеми тремя членами) полиномом второй степени. Для этого случая получена формула для определения крутизны фронта волны исходного возмущения, возникающей при отключении одного насоса на станции без резервуарного парка:

$$\left. \frac{dP(0,t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{N_0 \cdot \rho \cdot g \cdot (2 \cdot a_0 + a_1 \cdot Q_0)}{2 \cdot J \cdot \omega_0^2 \cdot \left( 1 + \frac{S \cdot g \cdot k}{2 \cdot c} \right)}, \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что крутизна фронта исходного возмущения прямо пропорциональна  $N_0$  и обратно пропорциональна моменту инерции  $J$  агрегата. От начальной подачи насосов  $Q_0$  крутизна фронта зависит очень слабо.

Расчеты (таблица 2) показали, что значения крутизны фронта исходного возмущения для всех рассматриваемых нефтепроводов близки друг к другу и по величине не превышают 3,55 кгс/см<sup>2</sup>/с. Необходимо отметить, что формула (7) дает несколько завышенные результаты, поскольку не учитывается момент сопротивления двигателя после его отключения.

### **Затухание исходного возмущения**

Затухание любого возмущения при его распространении по трубопроводу в решениях линеаризованных уравнений неустановившегося движения жидкости в трубопроводе определяется коэффициентом затухания  $\exp\left(-\frac{\zeta \cdot x}{c}\right)$  [5], где  $x$  – расстояние от места возникновения исходного возмущения. Коэффициент затухания показывает, какую часть от своего исходного значения составит возмущение, пройдя по трубопроводу расстояние  $x$ . При этом, коэффициент линеаризации потерь на трение рекомендуется определять, некоторым образом усредняя произведение коэффициента гидравлического сопротивления на скорость потока в заданном диапазоне скоростей (расхода). Поскольку в данном случае рассматривается крутизна фронта волн, то коэффициент линеаризации следует определять через производную гидравлического уклона  $i$  по расходу  $Q$ :

$$\zeta = \frac{S \cdot g}{2} \cdot \frac{di}{dQ} \Big|_{Q=Q_0}. \quad (8)$$

В частности, для зоны гидравлически гладких труб формула приобретает вид:

$$\zeta = \frac{1,75 \cdot S \cdot g}{2} \cdot \frac{i_0}{Q_0}. \quad (9)$$

Коэффициент затухания является убывающей функцией от расстояния и принимает максимальное значение при минимальном значении  $x$ . Поэтому минимальная длина участка принята  $l = 50$  км. Расчеты (таблица 1) показывают, что в рассматриваемых трубопроводах максимальное значение коэффициента затухания составляет 0,47, т.е. крутизна фронта уменьшается минимум в два раза. Минимальное значение коэффициента затухания 0,31 соответствует уменьшению крутизны фронта в три раза. Для каждого конкретного участка с учетом его длины, диаметра трубопровода, вязкости жидкости и расхода значение коэффициента затухания можно уточнить в соответствии с приведенной выше методикой.

### **Взаимодействие набегающей волны с насосной станцией**

Взаимодействие набегающей волны с насосной станцией определяется решением уравнений неустановившегося движения жидкости в трубах с нулевыми начальными условиями и с граничными условиями:

В сечении  $x = 0$ , где находится станция с отключившимся агрегатом, задана начальная крутизна фронта исходного возмущения  $\frac{dP(0,t)}{dt} \Big|_{t=0}$ .

В сечении  $x = l$ , где находится насосная станция с системой регулирования давления, для которой необходимо определить расчетное возмущение, граничным условием является зависимость суммарного напора всех включенных на станции насосов от подачи – соотношения (5), (5а). Направление потока от сечения  $x = l$  к сечению  $x = 0$ , т.е. возмущение распространяется против потока.

Требуется определить начальную скорость изменения давления на выходе этой станции.

В работе [7] эта задача решена с использованием известного решения эквивалентной задачи определения напряжений и токов в длинной электрической линии. При этом используется линеаризованная напорная характеристика насосов. В соответствии с этим решением скорость изменения давления на выходе станции определяется по формуле:

$$\left. \frac{dP(l,t)}{dt} \right|_{t=\frac{l}{c}} = \left. \frac{dP(0,t)}{dt} \right|_{t=0} \cdot \exp\left(-\frac{\xi \cdot l}{c}\right) \cdot (1 \pm \mu), \quad (10)$$

где  $\mu$  - коэффициент отражения волны от станции

Знак плюс используется для расчета давления на той стороне насосной станции, в направлении к которой движется волна возмущения и знак минус для давления на противоположной стороне станции. Таким образом, давление на стороне станции, в направлении к которой движется волна возмущения, увеличивается на величину отраженной волны и настолько же уменьшается на противоположной стороне.

Выражение  $P_{вз} = \left. \frac{dP(0,t)}{dt} \right|_{t=0} \cdot \exp\left(-\frac{\xi \cdot l}{c}\right)$  из (10) (11)

представляет собой крутизну фронта набегающей на станцию волны с учетом затухания.

Коэффициент отражения для НПС с резервуарным парком и без резервуарного парка определяется соответственно выражениями:

$$\mu = \frac{1 - \frac{c}{k_p \cdot g \cdot S}}{1 + \frac{c}{k_p \cdot g \cdot S}} \quad (12) \quad \text{и} \quad \mu = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot c}{k \cdot g \cdot S}} \quad (12a)$$

В настоящей работе величина отраженной волны определена с учетом нелинейности напорной характеристики насосной станции. Для этого рассмотрим взаимодействие набегающей на насосную станцию против потока волны с известной крутизной фронта  $H_{вз}$ ,  $Q_{вз}$ . Компоненты этой

волны в соответствии с формулой Жуковского связаны соотношением

$$H_{\text{вз.}} = -\frac{c \cdot Q_{\text{вз.}}}{g \cdot S}. \text{ Значение } H_{\text{вз.}} \text{ вычисляется пересчетом } P_{\text{вз.}} \text{ из (11) в метры.}$$

В результате взаимодействия набегающей волны с насосной станцией появляется отраженная от насосной станции волна изменения напора и расхода с крутизной фронта  $H_r, Q_r$ . Поскольку эта волна движется в направлении потока, то её компоненты связаны соотношением  $H_r = \frac{c \cdot Q_r}{g \cdot S}$ .

Суммарное изменение напора на выходе станции:

$$H_{\text{вз.}} + H_r = \Delta H = \frac{c \cdot (-Q_{\text{вз.}} + Q_r)}{g \cdot S}. \quad (13)$$

Для станции с резервуарным парком давление на входе станции не меняется, поэтому изменение напора станции с резервуарным парком равно этой величине:

$$\Delta H_{\text{см}} = \frac{c \cdot (-Q_{\text{вз.}} + Q_r)}{g \cdot S} \quad (14)$$

На станции без резервуарного парка изменение напора на выходе станции такое же, а на входе станции,  $-\frac{c \cdot (Q_{\text{вз.}} + Q_r)}{g \cdot S}$ , поэтому изменение напора станции без резервуарного парка:

$$\Delta H_{\text{см.}} = \frac{2 \cdot c \cdot Q_r}{g \cdot S}. \quad (14a)$$

С другой стороны изменение напора станции при изменении подачи на величину  $\Delta Q$  для НПС с резервуарным парком и без резервуарного парка соответственно составляют:

$$\Delta H_{\text{см.}} = H_{\text{см.}}(Q_0 + \Delta Q) - H_{\text{см.}}(Q_0) = -k_p \cdot \Delta Q + e_2 \cdot \Delta Q^2, \quad (15)$$

$$\Delta H_{\text{см.}} = H_{\text{см.}}(Q_0 + \Delta Q) - H_{\text{см.}}(Q_0) = -k \cdot \Delta Q + a_2 \cdot \Delta Q^2. \quad (15a)$$

Подставив в (15) и (15a) выражение для  $\Delta H_{\text{см.}}$  из (14) и (14a), соответственно получим:

$$\frac{c \cdot (-Q_{\text{вз}} + Q_r)}{k_p \cdot g \cdot S} = -(Q_{\text{вз}} + Q_r) + \frac{e_2 \cdot (Q_{\text{вз}} + Q_r)^2}{k_p}, \quad (16)$$

$$\frac{2 \cdot c \cdot Q_r}{k \cdot g \cdot S} = -(Q_{\text{вз}} + Q_r) + \frac{a_2 \cdot (Q_{\text{вз}} + Q_r)^2}{k}. \quad (16a)$$

Решив (16) и (16a) относительно  $Q_r$  и, принимая во внимание, что  $Q_{\text{вз}}$  и  $Q_r$  имеют разные знаки, можно найти коэффициент отражения с учетом нелинейности напорной характеристики:

$$\mu_r = -\frac{Q_r}{Q_{\text{вз}}}, \quad (17)$$

Нетрудно убедиться, что, если пренебречь в (16) и (16a) последним слагаемым, то с учетом (17) получатся выражения (12), (12a) для коэффициента отражения, которые получены в [7].

Расчеты (таблицы 2,3) показывают, что для рассматриваемых нефтепроводов и насосов коэффициент отражения от насосной станции с резервуарным парком с учетом нелинейности характеристики составляет  $0,29 \div 0,47$ , от насосной станции без резервуарного парка  $0,45 \div 0,55$ . При этом он может быть как меньше (в 1,7 раза), так и больше (до трех раз) коэффициента отражения при линейной характеристике станции. Поэтому для повышения точности расчета необходимо использовать представленную в данной работе методику.

## Выводы

1 Получено выражение для определения крутизны фронта исходного возмущения, возникающего при отключении насоса на перекачивающей станции без резервуарного парка. Крутизна фронта зависит главным образом от мощности отключаемого насоса и момента инерции насосного агрегата, от подачи насосов зависимость практически отсутствует. Для рассматриваемых нефтепроводов эта величина не превышает  $3,55 \text{ кгс/см}^2/\text{с}$ ;

2 Определено минимальное затухание исходного возмущения при его прохождении по участку трубопровода. Для рассматриваемых нефтепроводов оно оставляет от 0,31 до 0,47;

3 Разработана методика расчета отраженной волны с учетом нелинейности напорной характеристики насосной станции. Показано, что, если использовать линеаризованную характеристику, расчетные значения коэффициентов отражения могут отличаться (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения) в разы по сравнению со случаем нелинейной напорной характеристики;

4 Рассчитана крутизна фронта волны давления, возникающей на выходе перекачивающей станции с резервуарным парком и без резервуарного парка в результате взаимодействия станции с набегающей волной давления - крутизна фронта волны расчетного возмущения. Для принятых параметров насосов и нефтепроводов эта величина не превышает соответственно 2,14 кгс/см<sup>2</sup>/с; 2,34 кгс/см<sup>2</sup>/с.

### **Список используемых источников**

1 РД-35.240.50-КТН-109-13. Автоматизация и телемеханизация технологического оборудования площадочных и линейных объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Основные положения. М., 2013. 124 с.

2 Вязунов Е.В., Бархатов А.Ф. Быстродействие системы регулирования давления насосной станции при заданной скорости хода регулирующего элемента // Нефтегазовое дело: электрон. журн. 2014. № 2. С. 65-79.

3 Туманский А.П. Расчет уменьшения производительности нефтепровода при отключении одного насосного агрегата // Нефть, газ и бизнес. 2007. №4. С. 82-83.

4 РД 153-39.4-113-01. Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов. М., 2001. 44 с.

5 Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: «Недра», 1975. 296 с.

6 Вязунов Е.В., Голосовкер Б.И. Определение крутизны фронта волн при типичных возмущениях на магистральных нефтепроводах // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. М.: ВНИИОЭНГ. 1968. №10. С. 3-5.

7 Вязунов Е.В., Голосовкер Б.И. Определение крутизны фронта волн, набегающих на насосную станцию// Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. М.: ВНИИОЭНГ. 1969. № 6. С 9-12.

### References

1 RD-35.240.50-KTN-109-13. Avtomatizaciya i telemehanizaciya tehnologicheskogo oborudovaniya ploshadochnyh i lineinyh ob'ektov magistral'nyh nefteprovodov i nefteproduktprovodov. Osnovnye polozheniya. M., 2013. 124 s. [in Russian].

2 Vyazunov E.V., Barhatov A.F. Bystrodeistvie sistemy regulirovaniya davleniya nasosnoi stancii pri zadannoi skorosti hoda reguliruyushego elementa // Neftegazovoe delo: elektron. zhurn. 2014. № 2. S. 65-79. [in Russian].

3 Tumanskii A.P. Raschet umen'sheniya proizvoditel'nosti nefteprovoda pri otklyuchenii odnogo nasosnogo agregata // Neft', gaz i biznes. 2007. №4. S. 82-83. [in Russian].

4 RD 153-39.4-113-01. Normy tehnologicheskogo proektirovaniya magistral'nyh nefteprovodov. M., 2001. 44 s. [in Russian].

5 Charnyi I.A. Neustanovivsheesya dvizhenie real'noi zhidkosti v trubah. M.: «Nedra», 1975. 296 s. [in Russian].

6 Vyazunov E.V., Golosovker B.I. Opredelenie krutizny fronta voln pri tipichnyh vozmusheniyah na magistral'nyh nefteprovodah // Transport i hranenie nefti i nefteproduktov. VNIIOENG. 1968. №10. S. 3-5. [in Russian].

7 Vyazunov E.V., Golosovker B.I. Opredelenie krutizny fronta voln, nabegayushih na nasosnuyu stanciyu// Transport i hranenie nefti i nefteproduktov. VNIIOENG. 1969. № 6. S 9-12. [in Russian].



## **Сведения об авторах**

### **About the authors**

Бархатов А.Ф., аспирант кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

A.F. Barkhatov, Post-graduate Student of the Chair “Equipment and Welding Technology”, FSBEI NPE National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, the Russian Federation

e-mail: barkhatov-alex@yandex.ru

Вязунов Е.В., канд. техн. наук, г. Москва, Российская Федерация

E.V. Vyazunov, Candidate of Engineering Sciences, Moscow, the Russian Federation