УДК 62-50

УПРОЩЕННЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГИСТРАЛЬНОМ НЕФТЕПРОВОДЕ ПРИ ПУСКЕ НАСОСНОГО АГРЕГАТА НА РЕЖИМ

МАМЕДОВ А.И., АЛИЕВ Э.Я.*

Национальная Академия Авиации
**Азербайджанский Технический Университет*

Представлен новый упрощенный численный метод расчета переходных процессов в магистральных нефтепроводах, как в объекте с распределенными параметрами, описываемых уравнениями в частных производных параболического типа, при пуске насосного агрегата на заданный режим.
Получены новые рекуррентные соотношения, легко реализуемые на компьютере.

В настоящее время широко изучается возможность пуска центробежного насосного агрегата при открытой напорной задвижке магистрального нефтепровода, как наиболее прогрессивного способа пуска, обладающего рядом технико-экономических преимуществ по сравнению с пуском при закрытой напорной задвижке магистрального нефтепровода [1-3].

Исследование и изучение динамических режимов, возникающих в магистральном нефтепроводах в процессе пуска центробежного насосного агрегата на открытую напорную задвижку, необходимо для правильного выбора параметров системы защиты нефтепровода от гидравлических ударов и т.п.

Вопросы разработки упрощенных методов расчета переходных процессов в магистральных нефтепроводах оборудованных насосными станциями имеют важные научные и практические значения [1-7].

Одним из эффективных подходов упрощения решений задач динамики в магистральных нефтепроводах, оборудованных насосными агрегатами, является пренебрежение влиянием отраженных волн от конца труб [3, 4, 11].

В работе [11] представлен упрощенный численный метод расчета переходных процессов в магистральных нефтепроводах, как в объектах с распределенными параметрами, описываемых уравнениями в частных производных гиперболического типа (телеграфные уравнения), при пуске насосного агрегата на открытую задвижку без учета влияния отраженных волн от конца трубы.

Сущность предложенного численного метода основывается на использовании нового подхода - дискретного аналога интегрального уравнения свертки [7-10].

Преимуществом указанного численного является то, что он позволяет найти переходные процессы, возникающих в объектах с распределенными параметрами без перехода в область дискретных изображений, а также осуществлять переход от Лапласовых изображений искомых функций в область оригиналов без нахождения корней характеристических уравнений, что значительно упрощает математические вкладки и повышает точность расчетов.

Следует заметить, что предложенный новый подход [7-11], в отличие от существующих методов [12], позволяет заменить операцию непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулой не только прямоугольников, но и трапеций.

Указанные свойства нового подхода [7-11] существенно расширяют круг решаемых практических задач при решении проблем динамики в магистральных нефтепроводах, оборудованных насосными станциями.

В [11], в отличие от существующих работ [3-6], при разработке численного метода расчета, в общем случае, учитывается влияния реальных факторов, таких, как моменты инерции вращающихся масс, влияния механической характеристики приводного двигателя, напорной и мощностной характеристик насосного агрегата на возникающие переходные процессы в магистральном нефтепроводе.

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с дальнейшим развитием и обобщением работы [11] для разработки упрощенного численного метода расчета переходных процессов в магистральных нефтепроводах, как объекта с распределенными параметрами, описываемых уравнениями в частных производных параболического типа, при пуске насосного агрегата на открытую напорную задвижку.

Допустим, напор в нефтепроводе до включения насосного агрегата был постоянным и равным H_0. Требуется найти переходные процессы в магистральном нефтепроводе при пуске насосного агрегата в момент времени $t=0$ на открытую задвижку.

В общем случае переходные процессы, протекающие в магистральном нефтепроводе описывается телеграфными уравнениями:

$$-\frac{\partial H}{\partial x} = K_1 \frac{\partial Q}{\partial t} + K_3 Q\,, \qquad -\frac{\partial Q}{\partial x} = K_2 \frac{\partial H}{\partial t},\ 0 \le x \le \ell \tag{1}$$

где $H(x,t), Q(x,t)-$ соответственно изменение напора и расхода жидкости в любой точке магистрального нефтепровода в произвольный момент времени; $K_1 = \frac{1}{gF}, K_2 = \frac{gF}{c^2}, K_3 = \frac{2a}{gF}, 2a = \frac{\eta\omega_{cp}}{2D}$- коэффициент, линеаризованный по И.А.Чарному; $\eta-$коэффициент гидравлического сопротивления в формуле Дарси-Вейсбаха для потери напора в трение в трубе; $\omega_{cp}-$средняя по сечению скорость движения жидкости в стационарном режиме; F – поперечное сечение нефтепровода; c – скорость звука в жидкости; g – ускорение силы тяжести; $D-$ внутренний диаметр трубы; $\ell-$длина магистрального нефтепровода.

При этом переходные процессы, протекающие в магистральном нефтепроводе, описываются уравнениями в частных производных параболического типа:

$$-\frac{\partial H}{\partial x} = K_3 Q\,, \qquad -\frac{\partial Q}{\partial x} = K_2 \frac{\partial H}{\partial t},\ 0 \le x \le \ell \tag{2}$$

Согласно постановке задачи, начальные условия принимаются в виде:

$$H(x,t)_{t=0} = H_0, \qquad Q(x,t)_{t=0} = 0$$

При представлении магистрального нефтепровода в виде бесконечной линии с распределенными параметрами [3,4,11], для решения системы дифференциальных уравнений (2) достаточно ограничиться заданием одного граничного условия - либо по напору, либо по расходу.

В рассматриваемом случае граничное условие выбирается в виде:

$$H(x,t)_{x=0} = H_н(t),$$

где $H_н(t)$ - произвольный закон изменения напора в начале нефтепровода.

В данной постановке особенностью решения задачи, является то, что в граничном условии значение $H_н(t)$ в начале решения является неизвестной. Её значения определяется по ходу решения данной задачи.

При этом предполагается, что для привода насосного агрегата используется асинхронный электродвигатель. Уравнение движения насосного агрегата в системе относительных единиц можно представить в виде [2,3]:

$$T_Д \frac{dv(t)}{dt} = M_g(t) - M_c(t), \qquad (3)$$

где $T_D = \frac{n_c}{M_H} \cdot \frac{GD^2}{375}$ - постоянная времени, n_c -синхронная частота вращения приводного двигателя насосного агрегата; GD^2 -маховый момент насоса, $GD^2=GD^{11}+GD^{12}$ - маховый момент колеса насоса; QD^{12} - маховый момент ротора двигателя; $\mathrm{Mg}(t) = \frac{\mathrm{M_д}(t)}{\mathrm{M_н}}$ - вращающий момент электродвигателя насосного агрегата; $M_c(t) = \frac{M_c(t)}{M_H}$ - момент сопротивления насоса; $\nu(t) = \frac{n_D(t)}{n_c}$ - частота вращения вала приводного двигателя насоса; $\mathrm{M_н}$ - номинальный момент на валу насосного агрегата.

Вращающий момент M_g (t) для асинхронного двигателя является нелинейной функцией частоты вращения вала приводного двигателя насосного агрегата, т.е. *Mg(t)=Ф[ν(t)]*. Аппроксимируя нелинейную зависимость *Mg(t)=Ф[ν(t)]* кусочно-постоянной функцией получим:

$$Mg(t) = \hat{a}_j \pm \hat{b}_j \nu(t), \qquad (4)$$

где $j = \overline{1, k_0^/}, k_0^/$ – число аппроксимирующих участков; $\hat{a}_j, \hat{b}_j$ - параметры линеаризации в соответствующих участках механической характеристики приводного двигателя.

Мощностная характеристика центробежного насосного агрегата аппроксимируется выражением:

$$\mathrm{P}(t) = \hat{\mathrm{C}} \nu^3(t) + \hat{\mathrm{d}} \nu^2(t) q_{\mathrm{H}}(t), \qquad (5)$$

где $\hat{c}, \hat{d}$ -коэффициенты линеаризации мощностей характеристики насосного агрегата, $q_н(t) = \frac{Q_H(t)}{Q_{ном}}$ – изменение расхода в начальной точке магистрального нефтепровода.

Момент сопротивления на валу центробежного насоса определяется из выражения:

$$M_c(t) = \frac{P(t)}{\nu(t)} = \hat{c} \nu^2(t) + \hat{d} \nu \ (t) q_H(t) \qquad (6)$$

Выражение (6) с учетом (5) будет:

$$M_c(t) = \hat{c} \nu^2(t) + \hat{d} \nu \ (t) q_H(t) \qquad (7)$$

Следовательно, напорная характеристика центробежного насоса аппроксимируется выражением:

$$h_{HC}(t) = a_1 \nu^2(t) - b_1 q_H^2(t), \qquad (8)$$

где a_1, b_1 – коэффициенты аппроксимации напорной характеристики насосного агрегата.

Изменение напора на выходе насосного агрегата определяется выражением:

$$\mathrm{h_H}(t) = \mathrm{h_0} + \mathrm{h_{Hc}}(t),$$

(9)

где $h_H(t) = \frac{H_н(t)}{H_{ном}}, h_0$ -напор на входе насосного агрегата

Согласно предложенному подходу, на первом этапе необходимо найти Лапласовы изображения функций $H(x,t)$, $Q(x,t)$.

В связи с этим, при принятых начальных и граничных условии, из решения системы дифференциальных уравнений (2) получаем следующие выражения для указанных функций в операторной форме:

$$H(x,s)=\left(H_{н}(s)-\frac{H_0}{S}\right)e^{-\gamma x}+\frac{H_0}{S}, \qquad (10)$$

$$Q(x,s)=\frac{1}{b(s)}\left(H_{н}(s)-\frac{H_0}{S}\right)e^{-\gamma x}, \qquad (11)$$

где $\gamma(s)=\sqrt{k_2k_3}\cdot\sqrt{s}$ - операторный коэффициент распространения волны; $b(s)=\sqrt{\frac{k_3}{k_2}}\cdot\frac{1}{\sqrt{s}}$ - операторное волновое сопротивление магистрального нефтепровода; s – оператор преобразования Лапласа.

Второй этап решения задачи связан с осуществлением перехода от изображений (10), (11) в область оригиналов.

Однако в выражениях (10), (11) Лапласовы изображения $e^{-\gamma x}, \frac{1}{b(s)}e^{-\gamma x}$ не имеют табличные оригиналы. В связи с этим, согласно подходу [7-11], выражения (10), (11) можно представить в виде:

$$\frac{1}{s}H(\delta,s)=k_1(s)\left(H_{н}(s)-\frac{H_0}{s}\right)+\frac{H_0}{S^2}, \qquad (12)$$

$$\frac{1}{s}Q(\delta,s)=\frac{1}{b}k_2(s)\left(H_{н}(s)-\frac{H_0}{s}\right), \qquad (13)$$

где $b=\sqrt{\frac{k_3}{k_2}}$ – волновое сопротивление магистрального нефтепровода без учета потерь, $\delta=\frac{x}{\ell}$ - постоянный коэффициент, $k_1(s), k_2(s)$ – передаточные функции, имеющие табличные оригиналы;

$$k_1(s)=\frac{1}{s}e^{-\gamma\delta}, \qquad k_2(s)=\frac{\sqrt{s}}{s}e^{-\gamma\delta}$$

На основе теоремы свертки [5-10], переходя от уравнений (12), (13) относительно изображений к уравнениям относительно оригиналов, получим:

$$\int_0^t H(t-\theta,\delta)1(\theta)d\theta=\int_{l\delta/c}^{t}\left(H_{н}(t-\theta)-H_0\right)K_1(\theta)d\theta+H_0\int_0^t 1(\theta)1(t-\theta)d\theta, \qquad (14)$$

$$\int_0^t Q(t-\theta,\delta)1(\theta)d\theta=\frac{1}{b}\int_{\ell\delta/c}^{t}(H_H(t-\theta)-H_0)K_2(\theta)d\theta$$

(15)

где $k_1(t), k_2(t)$-известные табличные оригиналы передаточных функций $k_1(s), k_2(s)$;

$$k_1(t)=erfc\frac{R\delta}{2\sqrt{t}}, R=\sqrt{k_2k_3}\,\ell,$$

$$k_2(t)=\frac{1}{\sqrt{\pi t}}e^{-\frac{(R\delta)^2}{4t}},$$
$$erfct=1-erft,$$

$erft=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^t e^{-t_1^2}dt_1$ -функция ошибок Гаусса.

Интегральные уравнения (14), (15) могут быть решены численно, если заменить интегралы суммами.

В связи с этим, согласно подходу [7-11], для дискретизации интегральных уравнений (14), (15) связь между непрерывным временем t и дискретным n (n=0,1,2...) можно представить в виде:

$$T=nT/\lambda, \qquad (16)$$

где λ - любое целое число; T- абсолютный период повторения решетчатой функции.

Погрешность расчета связана с величиной λ. Чем больше выбрано число λ, тем в меньшей мере характеристики непрерывной функции отличается от соответствующих характеристик решетчатых.

Следует отметить, что при представлении магистрального нефтепровода в виде бесконечной линии с распределенными параметрами, значение T выбирается в виде $T=\tau$.

Проводя дискретизацию интегральных уравнений (14), (15) при выбранном интервале T/λ и заменяя операцию непрерывного интегрирования суммированием, пользуясь формулой трапеции [8], в системе относительных единиц вместо (14), (15) получим:

$$h[n,\delta]=\sum_{m=\lambda\delta}^{n}\left[\left(h_H[n-m]-h_0\right)k_1[m]+k_1[n-m+1]\left(h_H[m-1]-h_0\right)\right]+ \qquad (17)$$
$$+h_0\sum_{m=0}^{n}\left(1[m]1[n-m]+1[n-m+1]1[m-1]\right)-\sum_{m=1}^{n}\left(h[n-m,\delta]1[m]+1[n-m+1]h[m-1,\delta]\right)$$

$$q[n]=\sum_{m=\lambda\delta}^{n}\left[\left(h_H[n-m]-h_0\right)k_2[m]+k_2[n-m+1]\left(h_H[m-1]-h_0\right)\right]-$$
$$-\sum_{m=1}^{n}\left(q[n-m,\delta]1[m]+1[n-m+1]q[m-1,\delta]\right) \qquad (18)$$

где $k_1[n], k_2[n]$ -известные решетчатые функции;

$$k_1[n]=erfc\frac{R\delta}{2\sqrt{\frac{n\tau}{\lambda}}}, \qquad k_2[n]=\frac{1}{2\sqrt{\frac{\pi n\tau}{\lambda}}}e^{-\frac{(R\delta)^2}{4\frac{n\tau}{\lambda}}},$$

$h[n,\delta]=\frac{H[n,\delta]}{H_{ном}}$, $q[n,\delta]=\frac{Q[n,\delta]}{Q_{ном}}$, -изменение напора и расхода в решетчатой форме; $h_0=\frac{H_0}{H_{ном}}$.

В рекуррентные соотношения (17), (18) входит неизвестная функция $h[n]$- изменение напора в начальной точке магистрального нефтепровода в решетчатой форме.

Определение ее значения осуществляется по следующей методике. Поставляя в рекуррентные соотношения (18) $\delta=0$ (при x=0)получим:

$$q_н[n]=\frac{H_{ном}}{bQ_{ном}}h_{нс}[n-1]k_2^1[1]+B[n],\tag{19}$$

где $B[n]=\frac{H_{ном}}{bQ_{ном}}\sum_{m=2}^{n}\left(h_{нс}[n-m]k_2^/[m]+k_2^/[n-m+1]h_{нс}[m-1]\right),\qquad k_2^/[n]=\frac{1}{\sqrt{\frac{\pi n\tau}{\lambda}}}.$

bВыражение (8) в решетчатой форме можно представить в виде:

$$h_{нс}[n-1]=a_1\nu^2[n-1]-b_1q_н^2[n-1]\tag{20}$$

Выражение (17) с учетом (20) будет:

$$q_н[n]=\frac{H_{ном}}{bQ_{ном}}\left(a_1\nu^2[n-1]-b_1q_н^2[n-1]\right)k_2^/[1]+B[n].\tag{21}$$

В (21) для определения значения частоты вращения вала насосного агрегата $V\ \ [n]$ запишем выражение (3) в решетчатой форме:

$$\nu[n+1]=\frac{T}{\lambda T_D}\hat{a}_j+\left(1\pm\frac{T}{\lambda T_д}\hat{b}_j\right)\nu[n]-\frac{T}{\lambda T_D}M_c[n]\tag{22}$$

В выражении (22) значение момента сопротивления определяется из следующего выражения:

$$M_c[n]=\hat{c}\nu^2[n]+\hat{d}\nu[n]q_н[n].\tag{23}$$

При известном значении расхода $q_н[n]$ осуществляется переход к нахождению изменения напора $h_н[n]$ из следующего выражения:

$$h_н[n]=h_0+h_{нс}[n],\tag{24}$$

где $h_{нс}[n]=a_1\nu^2[n]-b_1q_н^2[n]$

Таким образом, определив значения напора $h_н[n]$ из (24), осуществляется переход к нахождению изменения напора и расхода в любой точке магистрального нефтепровода с помощью рекуррентных соотношений (17), (18).

Выводы

1. Разработанный упрощенный численный метод позволяет определить переходные процессы в магистральных нефтепроводах, описываемые уравнением в частных производных параболического типа, при пуске насосного агрегата на заданный режим с учетом влияния реальных факторов, таких, как моменты инерции вращающихся масс, влияния механической характеристики приводного двигателя, напорной и мощностной характеристик насосного агрегата на возникающие переходные процессы. Все это значительно расширяет круг решаемых задач.
2. Предложенный численный метод позволяет определить переходные процессы в магистральном нефтепроводе описываемых уравнениями в частных производных параболического типа, без нахождения операторного коэффициента распространения волны в ряды, что существенно упрощает математические выкладки и значительно повышает точность расчетов.

1. *Кадымов Я.Б., Мамедов А.И., Аскер-заде Б.А.* Расчет нестационарных режимов в неоднородных магистральных нефтепроводах, работающих по схеме «из насоса в насос» //Изв.вузов «Нефть и газ», 1983, № 6
2. *Мамедов А.И., Мусаев В.Г., Аскер-заде Б.А.* Расчет переходных процессов в магистральном нефтепроводе оборудованного насосным агрегатом //Изв. Вузов «Нефть и газ», 1979, № 12
3. *Вязунов Е.В.* Методика расчета перегрузок трубопровода по давлению в переходных процессах // Нефтяное хозяйство, 1973, № 9
4. *Машенко В.Н.* Применение операционного исчисления для исследования переходных процессов в магистральных нефтепроводах // Транспорт и хранения нефти и нефтепродуктов. М.,ВНИИОЭНГ, 1976, № 11
5. *Гусейнзаде М.А., Юфин В.А.* Неустановившиеся движения нефти и газа в магистральных трубопроводах. М., Недра, 1981.
6. Гидродинамические процессы в сложных трубопроводных системах/ Гусейнзаде М.А., Другина Л.И., Петрова О.Н., Степанова М.Ф. –М., Недра, 1991
7. *Пашаев А.М., Мехтиев А.Ш., Алиев Я.А., Мамедов А.И.* Новый метод определения расхода нефти, газа и нефтепродуктов для измерения диафрагменными расходомерами в магистральных газо-нефте и нефтепродуктопроводах с учетом реальных динамических режимов их работы. Изв. НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук, 2005, №3.
8. *Мехтиев А.Ш., Алиев Я.А., Мамедов А.И.* Повышение экологической безопасности окружающей среды магистральных газо- и нефтепродуктопроводов путем прогнозирования и своевременного устранения нештатных ситуаций // Ученые записки Национальной Академии Авиации, 2005, № 2.
9. *Алиев Я.А.* Обобщенный численный метод расчета переходных в системах бурового электропривода с распределенными параметрами. //Изв. НАН Азербайджана, серия наука о Земле, 2004, № 1
10. *Алиев.Я.А.* Численное определение динамических режимов в буровом электроприводе с распределенными параметрами при учете потерь и наличии инерционного звена на конце. //Доклады НАН Азербайджана, 2004, № 3-4.
11. *Мамедов А.И., Алиев Э.А.* Новый упрощенный численный метод расчета переходных процессов в магистральных нефтепроводах. //Изв.НАН Азербайджана, серия физико-математических наук, 2006, № 1.

NASOS QURUJUSU İŞƏ BURAXILARKƏN MAGİSTRAL NEFT KƏMƏRİNDƏ BAŞ VERƏN KEÇİD PROSESLƏRİNİN HESABLANMASI ÜÇÜN SADƏ ƏDƏDİ ÜSUL

MƏMMƏDOV A.İ., ƏLİYEV E.Y.

Məqalədə nasos qurujusu işə buraxılarkən magistral neft kəmərində baş verən keçid proseslərinin hesablanması üçün sadə ədədi üsul təklif edilmişdir.

NUMERICAL METHOD OF CALCULATION OF TRANSIENT PROCESSES IN THE OIL PIPLELINES WITH OF PUMP

MAMEDOV A.I., ALIYEV E.Y.

The numerical method of calculation of transient processes in the oil main pipelines with of pump.