

Гаррис Н.А., Гаррис Ю.О., Глушков А.А.

*(Уфимский государственный нефтяной технический университет)*

## **ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА (МОДЕЛЬ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ)**

### **ВВЕДЕНИЕ**

По "горячим" трубопроводам перекачиваются высоковязкие и высокозастывающие нефти (или нефтепродукты) при высоких температурах. Это особые трубопроводы. Обычные нефти перекачиваются без предварительного подогрева перед закачкой в трубопровод. Но практически все магистральные нефтепроводы неизотермические. От температуры зависит вязкость перекачиваемой нефти, гидравлическое сопротивление трубопровода, подача  $Q$  и давление  $P$  центробежных насосов (ЦБН). Следовательно, себестоимость перекачки также зависит от температурного режима трубопровода.

Поэтому расчет эксплуатационных режимов для летних и зимних условий, квазистационарных и нестационарных, должен выполняться с учетом теплообмена трубопровода с окружающей средой.

Неизотермичность потока может быть вызвана различными причинами:

1. Температура вязкой нефти может повышаться по мере ее следования на перегонах между насосными станциями за счет выделения тепла трения. Анализ фактического материала по 19-ти магистральным трубопроводам, включая нефтепроводы "Дружба", Шаим – Тюмень, Александровское – Анжеро - Судженск, Усть – Балык - Омск, нефтепроводы Западной и Северо-Западной Сибири, Верхне – Волжские, нефтепроводы Тэбук – Ухта, Уса – Ухта и др., выявил явные, в 1,5...2 раза по отношению к среднему значению, изменения коэффициента теплопередачи [1]. Этот факт свидетельствуют также о нестационарности теплообмена трубопроводов с окружающей средой.

Нестабильность теплогидравлических режимов магистральных нефтепроводов приводит к перерасходу электроэнергии на перекачку и превышению эксплуатационных затрат.

2. При закачке в трубопровод нефти с температурой, отличающейся от температуры окружающей среды вдоль трассы, формируется неизотермический начальный участок, длина которого может быть соизмерима или равна длине перегона между насосными станциями. Нефть, добытая из недр Земли, обработанная присадками (температура ввода присадок порядка 50...70°C) или прошедшая специальную термообработку, улучшающую ее транспортабельные свойства, перекачивается в неизотермическом режиме.

Так как температурные режимы начальных участков трубопроводов нестабильны, сильно зависят от климатических условий, то теплогидравлический расчет таких участков должен выполняться с учетом нестационарного теплообмена.

Характерная ситуация сложилась на нефтепроводе Кумколь – Каракоин Восточного филиала НКТН КазТрансОйл. В условиях глубокой недогрузки по

производительности расчет эксплуатационных режимов и обоснование способов перекачки вязкопластичной нефти, обладающей тиксотропными свойствами, весьма проблематичен. Введение депрессорных присадок в поток требует подогрева нефти и делает перекачку нефти по трубопроводу неизотермической.

Следует отметить, что использование присадок не решает проблемы. В холодные зимние периоды создаются ситуации, когда нефть прокачать невозможно.

В условиях Средней Азии способ "горячей" перекачки Кумкольских нефтей, не требующий дорогостоящих присадок, может оказаться экономически выгодным. Следует отметить, что имеется богатый опыт эксплуатации в подобных условиях крупнейшего "горячего" нефтепровода большого диаметра (720...1020 мм) Узень – Гурьев – Куйбышев, по которому перекачивалась высокозастывающая мангышлакская нефть с температурой застывания  $t_3 = 28$  °С и температурой нагрева  $t_n = 65$  °С.

В настоящее время этот трубопровод также неизотермический, но работает на пониженных температурных режимах, порядка 30 °С, так как смесь нефтей, идущая по трубопроводу, имеет умеренную вязкость. С увеличением доли высоковязких нефтей температура перекачки будет соответственно возрастать.

Для магистрального нефтепровода Уса – Ухта, по которому перекачиваются высокозастывающие нефти Тимано – Печерской нефтегазонасной провинции с добавлением депрессорных присадок, также остро стоит проблема расчета и обоснования режимов перекачки нефтей по трубопроводу. Дело в том, что доля тяжелой и высокопарафинистой нефти, обладающей вязкопластичными свойствами, в перспективе будет колебаться в пределах 37...56 % [2], а использование депрессорных присадок может не дать ожидаемого эффекта. Способ "горячей" перекачки в настоящее время рассматривается как альтернативный.

3. Особую сложность представляют собой расчеты "горячих" трубопроводов, по которым перекачка высоковязких и высокозастывающих жидкостей осуществляется при более высоких температурах, порядка 60...120 °С.

При "горячей" перекачке осуществляется подогрев нефти в печах промежуточных тепловых станций, что не только увеличивает себестоимость трубопроводного транспорта нефти или нефтепродуктов, но и ставит специфические проблемы надежности и экологической безопасности системы.

Так как подогретая нефть со временем остывает, а специально обработанная нефть теряет временно улучшенные транспортабельные свойства, то как для "горячих", так и для любых неизотермических трубопроводов, должны рассчитываться:

- 1) время безопасной остановки  $\tau_{\text{бо}}$  и пусковые параметры центробежных насосов (подача  $Q$  и давление  $P$ ) на момент возобновления перекачки;
- 2) время прогрева трубопровода  $\tau_{\text{пр}}$  при пуске его из холодного состояния;
- 3) время безопасной работы  $\tau_{\text{бр}}$  трубопровода на пониженных режимах (при временном уменьшении подачи насосов, снижении температуры нагрева перекачиваемой нефти и т.д.).

При расчетах эксплуатационных режимов неизотермических трубопроводов необходимо считаться с тем, что подобные системы практически не работают в проектных режимах по ряду причин, таких, как климатические изменения окружающей среды (температуры, свойств грунта и т.п.), сезонность

загрузки системы, поэтапный ввод мощностей, старение и износ оборудования, падение производительности вследствие истощения месторождений, изменение грузопотоков и т.д.

Поэтому, как для "горячих", так и просто неизотермических трубопроводов, характеризующихся менее интенсивной теплоотдачей, реальна опасность "замораживания" трубопровода или "сбрасывания" подачи вследствие чрезмерного роста гидравлического сопротивления. Поэтому к теплогидравлическим расчетам таких трубопроводов предъявляются повышенные требования. Кроме обычного проектировочного теплогидравлического расчета необходимо выполнять расчеты нестационарных режимов, таких, как пуск, остановка и возобновление перекачки.

В работе [3] показано, что не смотря на сложность и громоздкость названных расчетов, их можно унифицировать и оперативно выполнить универсальным методом динамических характеристик. С расширением практики использования ЭВМ, расчеты эксплуатационных режимов работы неизотермических трубопроводов можно предельно упростить, используя соответствующие алгоритмы.

Динамические характеристики могут быть построены для жидкостей с различными реологическими моделями [4, 5]. Большим преимуществом данного метода является то, что он позволяет учесть изменение подачи центробежных насосов вследствие изменения гидравлического сопротивления трубопровода. При использовании соответствующей программы на ЭВМ становится возможным учесть при этом также изменение и других параметров перекачки и теплообмена.

## ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМУЛЫ

Динамическая характеристика представляет собой совокупность суммарной характеристики насосов, графика потребного напора трубопровода, сетки мгновенных характеристик, построенных с шагом по температуре, а также вспомогательных кривых средней и конечной температур перекачиваемой жидкости, нанесенных на один график (рис. 1).

Строится динамическая характеристика на базе стационарной характеристики "горячего" трубопровода, каждая точка которой соответствует стационарному режиму перекачки.

Подачу насосов при нестационарном режиме теплообмена определяют по пересечению суммарной характеристики насосов с мгновенной характеристикой трубопровода.

Мгновенной характеристикой трубопровода называется графическая зависимость потерь напора от расхода жидкости по трубопроводу на данный момент времени, т.е., эта характеристика изотермическая, определяется средней температурой потока  $t_{cp}$ , меняет свою крутизну и "передвигается" по полю  $Q - H$ .

С изменением средней температуры потока меняется гидравлическое сопротивление трубопровода, следовательно изменяется и подача насосов. На динамической характеристике этот процесс отслеживается перемещением рабочей точки вслед за смещением мгновенной характеристики трубопровода.

Динамическую характеристику "горячего" неизотермического трубопровода можно построить, используя программу "Stac-Di", составленную на языке OBJECT PASCAL в среде Delphi.

## Динамическая характеристика "горячего" трубопровода

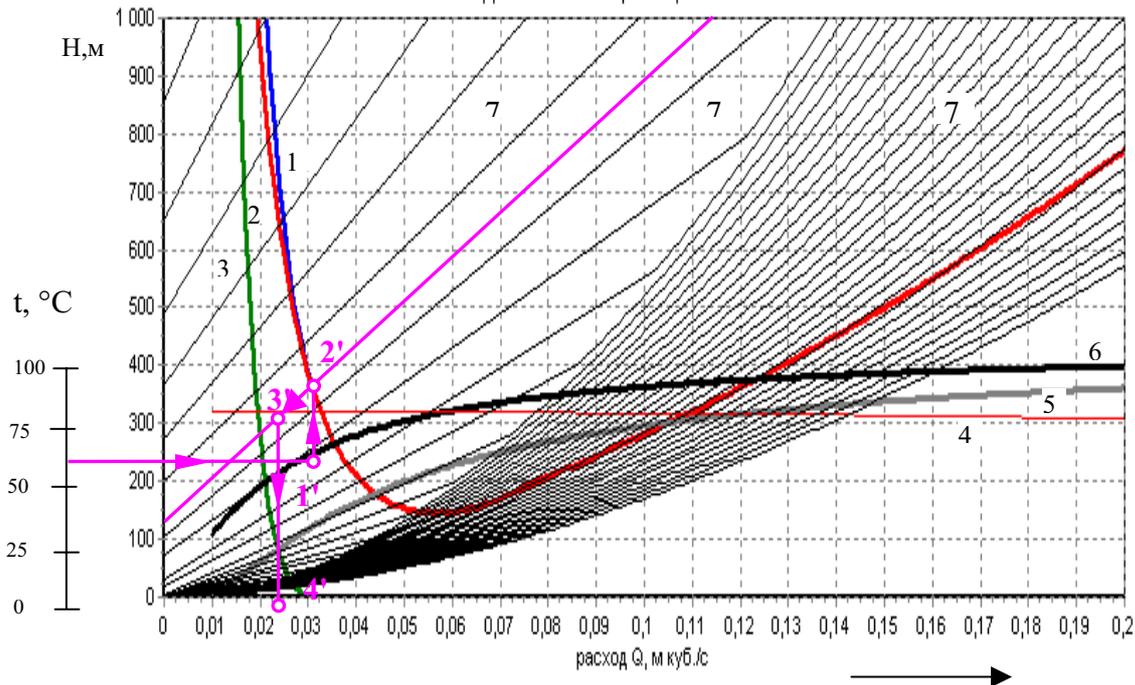


Рис. 1.

1 – стационарная характеристика "горячего" трубопровода; 2 – потери напора на вязкое трение; 3 – потери напора на преодоление статического напряжения сдвига; 4 – характеристика центробежного насос; 5 – температура нефти в конечном сечении трубопровода; 6 – средняя температура нефти; 7 – сетка мгновенных характеристик.

Программа "Stac-Di" позволяет выполнить теплогидравлический расчет эксплуатационных режимов перекачки теплоизолированного трубопровода, определить температуру перекачиваемой жидкости, потери напора и подачу ЦБН. В программе предусматривается также расчет двух надземных участков трубопровода.

Данный теплогидравлический расчет имеет особенность: потери энергии в трубопроводе на преодоление гидравлического сопротивления определяются как сумма потерь на трение  $h_v$  и статического напряжения сдвига  $h_{\tau_0}$ , что значительно упрощает расчет по сравнению с другими методиками [6].

Основой теплогидравлического расчета является определение температуры жидкости  $t_{nj}$  в начале и  $t_{kj}$  в конце каждого намеченного участка трубопровода, потерь напора  $h_j$  на преодоление гидравлического сопротивления участков и потребного напора  $H_{\text{потр}}$  для трубопровода в целом.

Расчет температуры в конечном сечении  $j$ -го участка при стационарном режиме работы трубопровода выполняется по уравнению В.Г. Шухова (1):

$$t_{kj} = t_{0j} + (t_{nj} - t_{0j}) \cdot e^{-\frac{K_j \pi d_j l_j}{Q \rho_j C_j}}, \quad (1)$$

Сопряжение решений выполняется по условию (2):

$$t_{n,j+1} = t_{kj}. \quad (2)$$

Величина коэффициента теплопередачи  $K$  определяется по формуле теплопередачи для трубы с многослойной изоляцией:

$$\frac{1}{Kd} = \frac{1}{\alpha_1 d} + \frac{1}{2\lambda_m} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{2\lambda_{из1}} \cdot \ln \frac{D_{из1}}{D} + \frac{1}{2\lambda_{из2}} \cdot \ln \frac{D_{из2}}{D_{из1}} + \frac{1}{\alpha_2 D_{из2}}. \quad (3)$$

Здесь  $K$  – коэффициент теплопередачи от нефти в окружающую среду;  
 $d$  и  $D$ , – внутренний и наружный диаметры трубопровода;

$D_{из1}$ ,  $D_{из2}$  – наружные диаметры первого и второго слоя изоляционного покрытия;

$\lambda_m$ ,  $\lambda_{из1}$ ,  $\lambda_{из2}$  – коэффициенты теплопроводности металла и слоев изоляционного покрытия;

$l$  – расстояние между тепловыми станциями;

$Q$  – объемная производительность нефтепровода;

$\rho$  и  $C$  – плотность и теплоемкость нефти при средней температуре потока;

$t_0$  – температура окружающей среды - грунта на глубине заложения нефтепровода в ненарушенном тепловом состоянии (вместо  $t_0$  учитывается температура воздуха  $t_b$ , если участок трубопровода надземный);

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – внутренний и внешний коэффициенты теплоотдачи.

Предполагается, что перекачка высоковязких жидкостей в рабочем диапазоне температур может происходить как при турбулентном, так и при ламинарном режиме, поэтому величиной  $1/\alpha_1 d$  пренебрегать нельзя.

Внутренний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  для каждого участка определяется по формулам М.А. Михеева [7]:

$$Nu = 0,17 Re_f^{0,33} Pr_f^{0,43} Gr_f^{0,1} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (4)$$

для  $Re_f \leq 2000$ ;

$$Nu = 0,021 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (5)$$

для  $Re_f \geq 10000$ ;

в зависимости от чисел Нуссельта  $Nu$ , Рейнольдса  $Re$ , Прандтля  $Pr$  и Грасгофа  $Gr$  (индекс "f" означает, что число определено при температуре потока, "w" - при температуре стенки):

$$Nu = \frac{\alpha_1 d}{\lambda}; \quad Re = \frac{4Q}{\pi D \nu}; \quad Pr = \frac{\nu C_p \rho}{\lambda}; \quad Gr = \frac{d^3 g \beta (t_f - t_w)}{\nu^2}. \quad (6)$$

где:  $\nu$  и  $\lambda$  - кинематическая вязкость и теплоемкость жидкости;

$\beta$  - коэффициент температурного расширения.

В области  $2000 < Re_f < 10^4$  внутренний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  определяется интерполяцией.

Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  можно определять и по другим критериальным зависимостям, например, по зависимости Джилла и Рассела, полученной на промышленных трубопроводах, что не меняет структуры программы.

Расчет параметров теплообмена по формулам (3 - 6) выполняется методом последовательных приближений с проверкой температуры стенки трубы  $t_{wj}$  по уравнению теплового баланса

$$\alpha_{1j} (t_{fj} - t_{wj}) = K_j (t_{fj} - t_{0j}), \quad (7)$$

где температура потока  $t_{fj}$  определяется как среднеинтегральная величина на рассматриваемом участке:

$$t_{fj} = t_{0j} + \frac{t_{nj} - t_{kj}}{\ln \frac{t_{nj} - t_{0j}}{t_{kj} - t_{0j}}}. \quad (8)$$

Для надземного участка в уравнениях (7) и (8) вместо  $t_0$  учитывается температура воздуха  $t_b$ .

Зависимость теплофизических свойств перекачиваемой жидкости: плотности  $\rho$ , теплоемкости  $C$  и теплопроводности  $\lambda$  от температуры учитывается по формуле (9) и формулам Крето (10 - 11), записанным в системе СИ:

$$\rho = \frac{\rho_{20}}{1 + \beta_p(t - 20)}; \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{0,101}{\rho_{15}}(1 - 0,00054 \cdot t) \cdot 1163, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}; \quad (10)$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{\rho_{15}}}(53357 + 107,2 \cdot t), \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}; \quad (11)$$

где 
$$\rho_{15} = \frac{\rho_{20}}{1 + \beta_p(15 - 20)}.$$

На основании (4 - 6)  $\alpha_1 = \text{Nu} \frac{\lambda}{d}.$

Для подземного участка трубопровода внешний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  определяется по формуле П.И. Тугунова – В.С. Яблонского:

$$\alpha_2 = \frac{2\lambda_{гр}}{D_{из2} \cdot \ln \left( \frac{4H'}{D_{из}} + \frac{\lambda_{гр}}{\lambda_b H'} \right)}. \quad (12)$$

где 
$$H' = H_0 + \delta_{сн} \frac{\lambda_{гр}}{\lambda_{сн}};$$

$H_0$  – глубина заложения трубопровода до оси;

$\lambda_{гр}$  – расчетное значение коэффициента теплопроводности грунта [8];

$\delta_{сн}, \lambda_{сн}$  – толщина снежного покрова и коэффициент теплопроводности снега;

$\lambda_b$  – коэффициент теплопроводности воздуха.

Внешний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  для надземного участка трубопровода определяются в зависимости от скорости ветра  $V_b$  по формуле [7]:

$$\alpha_2 = (12 + 7\sqrt{V_b}), \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (13)$$

Потери напора на  $j$ -ом участке трубопровода определяются как сумма потерь энергии на трение и на преодоление сдвиговых напряжений [9]:

$$h_j = h_{vj} + h_{tj}. \quad (14)$$

Потери напора на трение  $h_{vj}$ , с учетом вязкостно - температурной зависимости по Рейнольдсу – Филонову, осевого градиента температур по В.Г. Шукову, радиального по М.А. Михееву, на каждом участке определяют по формуле:

$$h_{vj} = \beta_j \frac{Q^{2-m_j} v_{*j}^{m_j}}{d_j^{5-m_j}} \cdot \frac{e^{u_j m_j (t_{sj} - t_{0j})}}{a_{\infty j}} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{Ei} \left[ -u_j \left( m_j - \frac{1}{3} \cdot \frac{K_j}{\alpha_{1j}} \right) \cdot (t_{nj} - t_{0j}) \right] - \\ \text{Ei} \left[ -u_j \left( m_j - \frac{1}{3} \cdot \frac{K_j}{\alpha_{1j}} \right) \cdot (t_{kj} - t_{0j}) \right] \end{array} \right\}, \quad (15)$$

$$\text{где } a_{\infty j} = \frac{K_j \pi d_j}{Q \rho_j C_j};$$

$\beta, m$  – коэффициенты в формуле Лейбензона;

$u$  – крутизна вискограммы;

$-\text{Ei}[-x]$  – интегральная показательная функция от отрицательного аргумента.

Потери напора  $h_{\tau j}$  на преодоление предельного напряжения сдвига

$$\tau_0 = \tau'_0 \cdot e^{-st} - y \quad (16)$$

определяются по формуле [4, 5]:

$$h_{\tau j} = \frac{16}{3 \rho_j g d_j a_{\infty j}} \cdot \left[ \tau'_0 e^{-st_{0j}} \{ \text{Ei}[-S(t_y - t_{0j})] - \text{Ei}[-S(t_{kj} - t_{0j})] \} - y \cdot \ln \frac{t_y - t_{0j}}{t_{kj} - t_{0j}} \right]. \quad (17)$$

С учетом линейной аппроксимации (18)

$$\tau_0 = \tau_0'' \frac{t_y - t}{t_y - t_{0j}} \quad (18)$$

потери напора  $h_{\tau}$  на преодоление предельного напряжения сдвига определяются более простым выражением [10]:

$$h_{\tau j} = \frac{16 \tau_0''}{3 \rho_j g d_j a_{\infty j}} \cdot \frac{1}{\left( \ln \frac{t_y - t_{0j}}{t_y - t_{0j}} + \frac{t_{kj} - t_{0j}}{t_y - t_{0j}} - 1 \right)}. \quad (19)$$

Здесь  $\tau'_0, s, y, \tau_0''$  – эмпирические коэффициенты в формулах (16) и (18);

$t_y$  – температура появления предельного напряжения сдвига.

Потребный напор в начальном сечении трубопровода, при разнице геометрических отметок конечного и начального сечения трубопровода  $\Delta z = z_2 - z_1$ , остаточном давлении  $P_2$  в конце трубопровода, с учетом потерь на местные сопротивления в размере 5% от линейных потерь, равен:

$$H_{\text{потр}} = \Delta z + \frac{P_2}{\rho g} + (1,02 \dots 1,05) \cdot \sum_{j=1}^D (h_{vj} + h_{\tau j}) \quad (20)$$

## ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ МГНОВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Мгновенная характеристика строится по формуле Лейбензона:

$$h = \beta \frac{Q^{2-m} v_{cp}^m L}{d^{5-m}}, \quad (21)$$

где

$$v_{cp} = v_* e^{-u(t_{cp} - t_*)}. \quad (22)$$

Мгновенная характеристика – характеристика изотермическая; представляет собой графическую зависимость потерь напора от расхода на

данный момент времени, при осредненных значениях  $t_{cp}$  и  $v_{cp}$  для всего трубопровода.

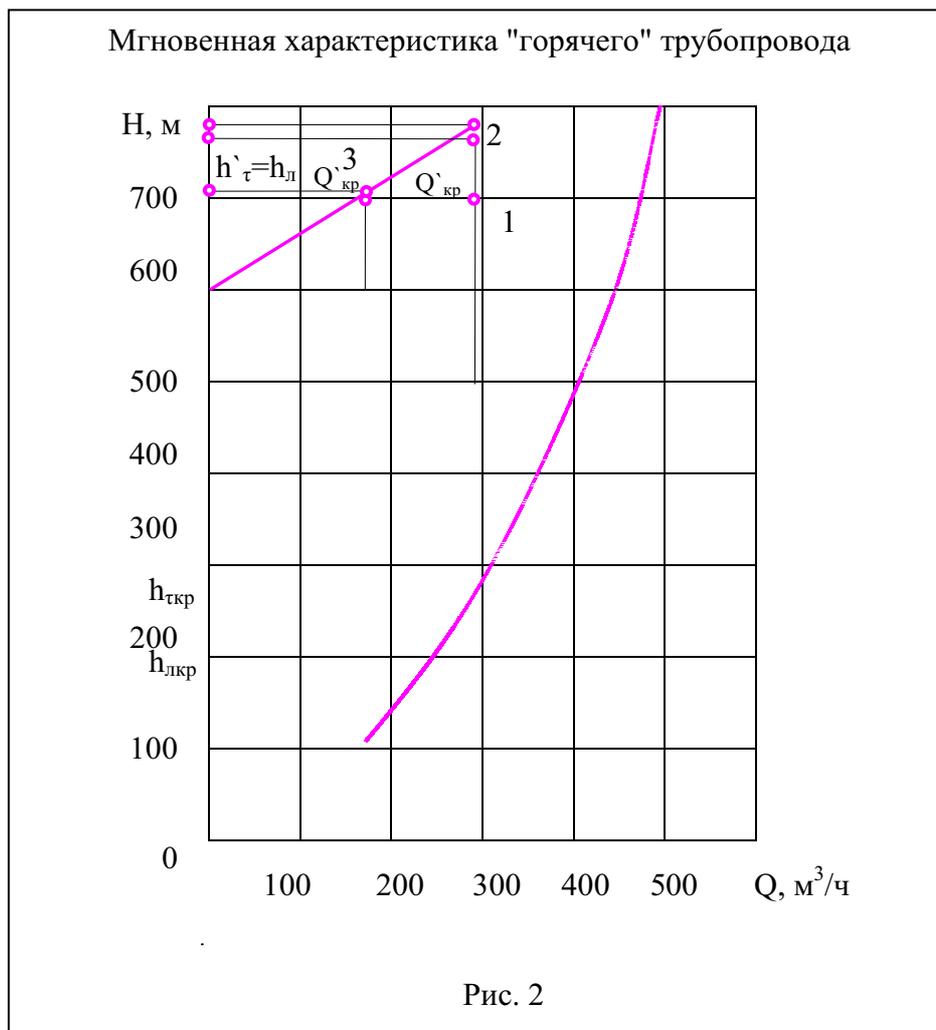
При построении сетки мгновенных характеристик с шагом по температуре  $\Delta t$  густота сетки получается неравномерной, разреженной в области малых расходов.

Если сетку мгновенных характеристик строить с шагом по вязкости,  $\Delta v_{cp}$ , то густота сетки получается более равномерной.

Следует отметить, что изотермическая характеристика, построенная по (23), имеет скачок напоров  $h_T/h_L = 1,5$  при  $Re_{кр} = 2000$ :

$$\frac{h_T}{h_L} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \cdot \frac{Re}{64} = 1,48 \approx 1,5. \quad (23)$$

В "горячем" трубопроводе, где смена режима происходит постепенно по всей длине, такого скачка не должно быть. Поэтому при построении изотермической мгновенной характеристики в качестве критического берем число Рейнольдса  $Re_{кр}'$ , при котором скачок отсутствует, см. рис 2.



Через каждую точку стационарной характеристики можно провести мгновенную характеристику. Поэтому точки стационарной характеристики можно считать опорными.

Построение сетки мгновенных характеристик выполняется с помощью "опорной" точки.

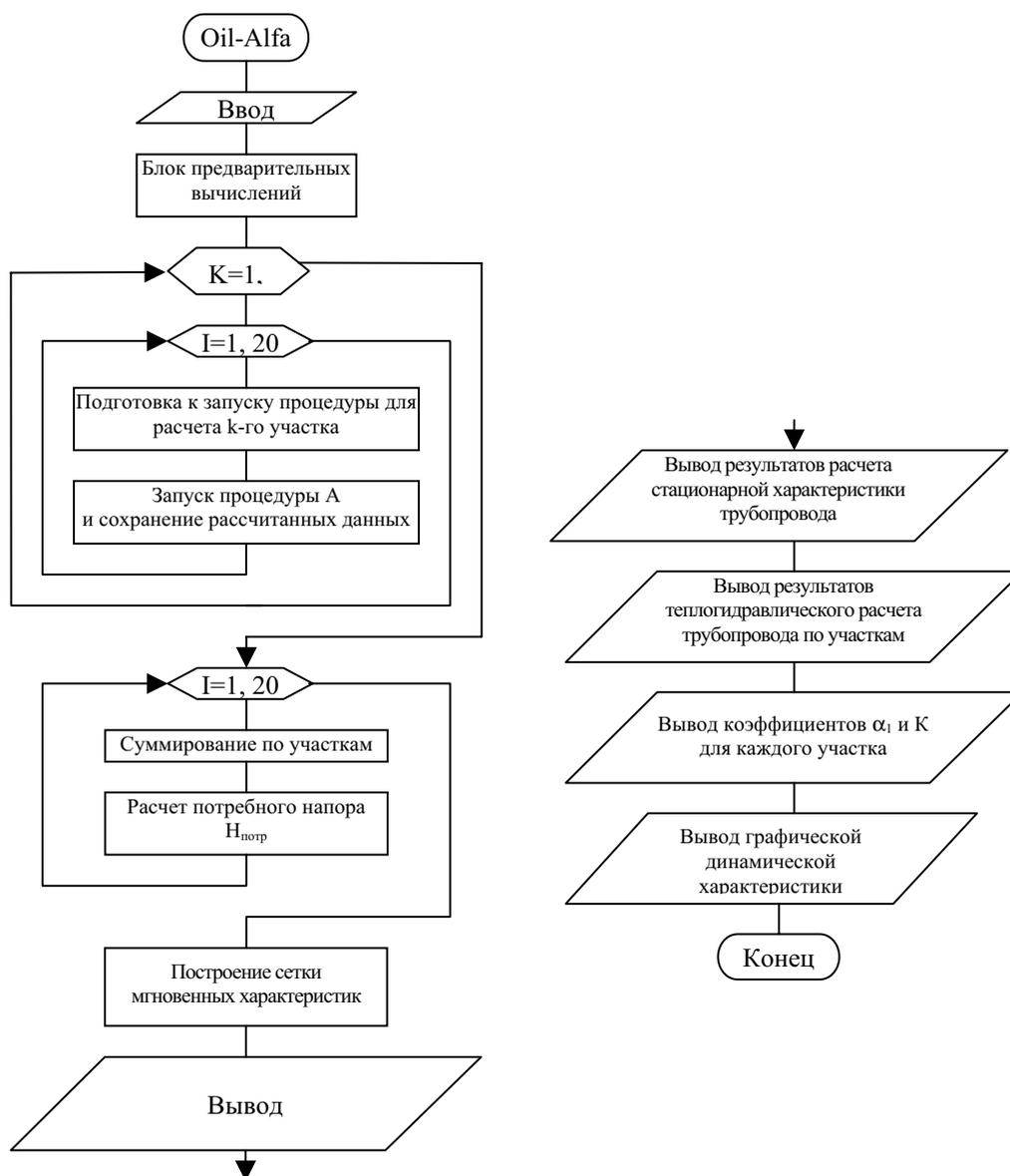
Например, на рис. 1 среднему значению температуры  $t_{cp} = 80^{\circ}\text{C}$  соответствует точка 2'. Построение 1'-2'-3'-4' дает подачу  $Q_4$ .

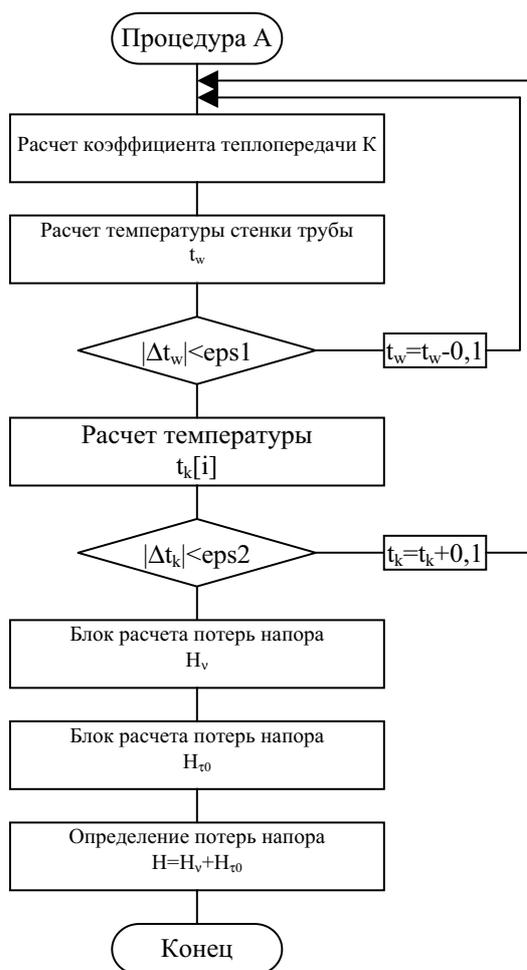
При построении сетки мгновенных характеристик выбирают удобную, с достаточным шагом густоту сетки, чтобы определение пусковых или рабочих параметров ЦБН не вызывало затруднений.

Для этой цели в программе "Stac-Di" предусмотрен компонент RadioButton, позволяющий переключать режим удаления построенных графиков с динамической характеристики трубопровода.

Такое решение удобно и тем, что позволяет анализировать влияние различных факторов (например, температуры нагрева вязкопластичной жидкости, климата и др.) на подачу ЦБН.

#### АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ





Программа "Stac – Di" разработана на языке OBJECT PASCAL в среде Delphi. Имеет удобный пользовательский интерфейс, рассчитана на работу в среде Windows 9x/NT/2000/XP, предназначена для расчета эксплуатационных теплогидравлических режимов "горячих" нефтепродуктопроводов методом динамических характеристик и позволяет:

1. Выполнить расчет по участкам, как в подземном, так и в надземном вариантах.
2. В пределах каждого участка учесть смену режима перекачки, турбулентного на ламинарный, если она происходит.
3. В пределах каждого участка рассчитать составляющую, учитывающую предельное напряжение сдвига, если оно имеет место.
4. Рассчитать теплотери на надземном и подземном участках по различным алгоритмам.
5. Рассчитать внутренний коэффициент  $\alpha_1$  через критериальные зависимости на каждом участке, что значительно повышает точность теплогидравлического расчета при ламинарном режиме перекачки.
6. Учесть зависимость теплофизических свойств перекачиваемой жидкости: вязкости, плотности, теплоемкости и теплопроводности от температуры.

7. Построить сетку мгновенных характеристик, с помощью которой можно определять параметры работы насосов при работе системы в нестационарных режимах.

Описания всех входных данных находятся в окне ввода данных программы. Результаты расчета выводятся как в виде таблиц, так и в виде графиков.

### **ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАЗУТОПРОВОДА. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ.**

Программа "Stac-Di" апробирована на мазутопроводе СНХК-Стерлитамакская ТЭЦ, протяженностью 33 км, диаметром 426 мм [11]. Трубопровод теплоизолирован, имеет надземный участок длиной 4,5 км. В связи с потребностями ТЭЦ, а также, с частичным переходом на газовое потребление, мазутопровод работает периодически, причем система в целом работает с большой недогрузкой по производительности.

Т.к. мазутопровод должен надежно функционировать в любой ситуации, то возникла необходимость в уточненных теплогидравлических расчетах эксплуатационных режимов перекачки. Основой таких расчетов является расчет стационарных режимов, которые можно выполнить по предлагаемой программе. Ниже приводятся результаты расчетов, выполненные для условий летнего периода эксплуатации мазутопровода.

#### **Сравнение результатов расчета с данными промышленного эксперимента, проведенного на мазутопроводе СНХК – СТЭЦ**

Таблица 1

Дата	$T_{нэ}, ^\circ\text{C}$	$Q_{нэ}, \text{м}^3/\text{ч}$	$P_2 \times 10^5, \text{Па}$	$P_1 \times 10^5, \text{Па}$	$\delta = \frac{P_2 - P_1}{P_2} \cdot 100\%$
16.06.79	83,0	208	5,50	-	-
17.06.79	86,5	186	5,10	-	-
18.06.79	87,0	192	5,35	-	-
22.06.79	84,0	212	5,70	-	-
23.06.79	84,0	212	5,70	-	-
с 16.06.79 по 23.06.79	84,9	202	5,47	6,25	-14,3

Для сравнения использованы данные промышленного эксперимента по остановке перекачки, который был проведен сотрудниками кафедры "Гидравлика и гидромашин" УГНТУ и "Башкирэнерго" на мазутопроводе СНХК – СТЭЦ в 1979 г.

Перед запланированной остановкой перекачки в течение недели, с 16.06.79 по 23.06.79., теплогидравлический режим стабилизировался, т.е., температура нагрева мазута перед закачкой его в трубопровод и подача насосов поддерживались примерно постоянными, см. табл. 1.

Стабилизация режима была необходима, т.к. практически мазутопровод работал с частыми изменениями температуры перекачки и производительности, что свидетельствует о нестационарном режиме его работы. Следует отметить, что

нестационарный режим работы характерен также и для магистральных неизотермических трубопроводов.

Сравнение результатов расчета показывает, что, данную программу можно использовать для расчетов эксплуатационных режимов перекачки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа "Stac-Di", разработанная в среде Delphi, предназначена для расчета горячих трубопроводов по которым перекачивается вязкопластичная жидкость (модель Шведова-Бингама). Алгоритм программы учитывает параметры трубопровода, перекачки, теплообмена, а также зависимость свойств нефти от температуры. С ее помощью можно рассчитать потери напора на трение, на преодоление статического напряжения сдвига, полные потери, конечную, среднюю и критические температуры в зависимости от расхода.

С целью графической иллюстрации в программе "Stac-Di" с помощью компонента Chart реализовано графопостроение стационарной и динамической характеристик трубопровода. Этот компонент позволяет менять масштаб и сдвигать график с помощью компьютерной мыши. Использование компонента CheckBox позволяет не загромождать график, выводя только нужные кривые.

Благодаря компоненту RadioButton, позволяющего переключать режим удаления построенных графиков, возможно изучение влияния различных факторов (к примеру, температуры нагрева вязкопластичной жидкости перед закачкой ее в трубопровод) на гидравлическое сопротивление трубопровода и подачу ЦБН. Программа проста в пользовании, имеет удобный interface, позволяет вывести на печать как таблицу расчетов, так и графики в том виде, в каком они изображены на мониторе, а также динамическую характеристику системы.

Программа "Stac-Di" реализована в двух режимах: для построения стационарной и динамической характеристик магистрального трубопровода.

Требования к программе: любая версия Windows.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новоселов В.В., Гаррис Н.А., Тугунов П.И. и др. Прогнозирование теплофизических свойств грунтов при выполнении расчетов неизотермических трубопроводов // ОИ "Транспорт и хранение нефти". – М.: ВНИИОЭНГ. 1989. 31 с.

2. Коротков В.П., Конради В.В., Туманян Б.П. и др. Применение депрессорной присадки при трубопроводном транспорте смесей высокозастывающих нефтей северных месторождений Тимано – Печерской нефтегазоносной провинции // Трубопроводный транспорт нефти. 1994. № 11, С. 11 – 12.

3. Тугунов П.И., Гаррис Н.А. Применение динамических характеристик для расчетов эксплуатационных режимов неизотермических трубопроводов // ОИ "Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов" – М.: ВНИИОЭНГ, 1985. С. 60.

4. Методика расчета эксплуатационных режимов теплоизолированных мазутопроводов. Главнефтеснаб РСФСР // Отрасл. лабор. трубопр. транспорта. / Тугунов П.И., Гаррис Н.А., Заболотникова Л.П. и др. – Уфа: УНИ, 1979. – 79 с.

5. Методика теплогидравлического расчета мазутопроводов. Госкомнефтепродукт РСФСР // Отрасл. лабор. трубопров. транспорта / Тугунов П.И., Гаррис Н.А., Галиев В.С. – Уфа: УНИ, 1982. – 55 с.
6. Методика теплового и гидравлического расчета магистральных трубопроводов при стационарных и нестационарных режимах перекачки ньютоновских и неньютоновских нефтей в различных климатических условиях. РД 39 – 30 – 139 – 79. Миннефтепром. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1979. – 56 с.
7. Тугунов П.И. Тепловая изоляция нефтепродуктопроводов и резервуаров. – М.: Недра, 1985. – 152с.
8. Выбор коэффициента теплопроводности грунта при проектировании трубопроводов / Тугунов П.И. Гаррис Н.А., Новоселов В.В. и др. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1987. - РД 39 - 0147103 - 386 – 87. - 26 с.
9. Казубов А.И., Щербаков С.Г., Черников В.И. Перекачка вязкопластичных высокозастывающих нефтей с подогревом. – НТС "Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов". ВНИИОЭНГ, 1965, № 7, С. 3-7.
9. Гаррис Н.А. Эксплуатация нефтепродуктопроводов в различных температурных режимах и нагрузках при условии сохранности экологической среды: - Автореферат дисс. ... д - ра техн. наук. – Уфа, 1998. - 48 с.
11. Гаррис Н.А., Гаррис Ю.О. Расчет эксплуатационных режимов нефтепродуктопроводов с применением динамических характеристик. Нефтегазовое дело. [http://www.ogbus.ru/authors/Garris/Garris\\_3.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Garris/Garris_3.pdf). 13.11.03.