

Н. Гаррис, Ю. Гаррис

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

## **РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ НЕФТЕПРОДУКТОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

### **ВВЕДЕНИЕ**

К качеству расчетов эксплуатационных режимов неизотермических трубопроводов предъявляются повышенные требования, так как высокая вязкость и сдвиговые напряжения, появляющиеся при перекачке у многих нефтей и нефтепродуктов при температурах окружающей среды, требуют чрезмерно высоких энергозатрат для преодоления гидравлического сопротивления трубопровода, а тиксотропные свойства исключают возможность остановки перекачки на продолжительное время. При "горячей" перекачке потребность в тепле в течение года меняется: летом расход тепла на подогрев меньше, чем зимой. Отсюда следует, что теплогидравлический режим трубопровода в течение года переменный. Кроме этого, подача центробежных насосов (ЦБН) и работа печей в течение года меняются по технологическим причинам, включая плановые и аварийные остановки. Проектный стационарный режим на неизотермических трубопроводах практически не достигается, и трубопроводы редко эксплуатируются в том режиме, на который проектируются, работая с недогрузкой.

### **ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ**

Современный уровень методов расчета нестационарных режимов работы неизотермических трубопроводов позволяет рассчитывать указанные процессы лишь приближенно, с той или иной степенью точности. Это объясняется сложностью сопутствующих явлений и трудностью их математического описания. Существующие методы расчета и отраслевой стандарт не учитывают изменения подачи насосов  $Q$  вследствие изменения гидравлического сопротивления трубопровода при неизотермических нестационарных процессах. Колебания подачи насосов и температуры перекачки жидкости взаимосвязаны. Поэтому принятие постоянства  $Q = \text{const}$  правомерно лишь для поршневых насосов.

При длительной работе ЦБН на "горячий" трубопровод см. рис., рабочие параметры системы определяются т. А пересечения стационарной характеристики "горячего" трубопровода I с характеристикой насосов V. При нестационарной работе режим работы определяется пересечением мгновенной характеристики с насосной характеристикой, т.е. точками B<sub>i</sub>. Мгновенной характеристикой называется графическая зависимость потерь напора от расхода жидкости по трубопроводу на данный момент времени. Эта характеристика изотермическая. Так как расход жидкости по трубопроводу меняется во времени вследствие

изменения гидравлического сопротивления, то рабочая точка  $B_i$  будет перемещаться по характеристике ЦБН, стремясь при прогреве к т.А, а при охлаждении - к т. С, сбрасывая подачу до "0" (т.Д).

Как видно, развитие подобных процессов зависит от двух факторов: крутизны насосной характеристики и тепловой инерции грунта, которая определяет темп прогрева или темп охлаждения трубопровода.

Практика эксплуатации трубопроводных систем показывает, что "горячие" магистральные трубопроводы эксплуатируются в нестационарных режимах, со сложным наложением "предистории" переключений, остановок и возобновлением перекачек. Это приводит к тому, что теоретически в течение года вокруг трубы нет одинаковых температурных полей. Многочисленные диспетчерские данные свидетельствуют о том, как часто не коррелируются значения гидравлических потерь  $h$  в трубопроводе и температурных режимов  $t_n$  и  $t_k$ . Обычно исследователи относят это к неточности замеров и погрешности экспериментов. Но объяснение может быть и другое, вполне определенное.

В силу тепловой инерции грунта, при смене режимов, сопровождающихся изменением удельного теплового потока в грунт, на разном удалении от трубы могут идти разные процессы. Например, вследствие резкого снижения температуры перекачки в прилегающем слое грунта начнется охлаждение, в то время, как на удалении будет продолжаться прогрев. Это объясняется тем, что в силу тепловой инерции грунта, волна возмущения дойдет до удаленных областей лишь через некоторый промежуток времени. Но до того на периферии будет продолжаться "предыдущий" прогрев. И так далее. С каждым изменением идет волнообразное "наслоение" воздействий, как по длине трубопровода, так и в поперечных сечениях, т.е. по массиву. Отметим также, что эти трансформации не имеют четко обозначенных границ и трудно определимы. Тем не менее все это существенно отражается на нестационарном коэффициенте теплопередачи  $K_t$ , который, при том же температурном напоре  $t_{tr}-t_e$  может сильно отличаться от стационарного. Так как  $K_t$  входит в формулы расчета гидравлических потерь, то становится понятным кажущееся несоответствие потерь  $h$  с температурным режимом  $t_n$  и  $t_k$ . То же самое можно сказать и о тепловом потоке  $q$ .

В грунте происходит сложнейшее перераспределение не только температур, но и влажности. Коэффициенты теплопереноса в таких случаях практически неопределимы.

Помимо указанных причин на эксплуатацию трубопроводных систем влияют климатические условия, проявляющиеся в виде экстремальных ситуаций, связанных с резким изменением температуры окружающей среды, обильными осадками, паводками, наводнениями, засухами и пр. условиями, значительно изменяющими характер теплообмена, следовательно и гидравлическое сопротивление трубопровода и, как результат, нарушающие подачу насосов.

Подача центробежных насосов уменьшается с увеличением гидравлического сопротивления трубопровода, а темп ее падения зависит от крутизны характеристики ЦБН. Снижение производительности является причиной чрезмерного охлаждения и понижения температуры по мере следования жидкости до конечного пункта трубопровода. Процесс сбрасывания подачи насосов продолжается до полного прекращения подачи и "замораживания" трубопровода, если не принять специальных мер.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Если учесть, что такой параметр, как производительность трубопровода, определяется не только его гидравлическим сопротивлением, но и возможностью насосно-силового оборудования, см. т. А на рис., то становится очевидной необходимость учета насосной характеристики (5) в системе дифференциальных уравнений (1 - 7), описывающих нестационарные процессы, при соответствующих краевых условиях и общепринятых допущениях:

- движения

$$\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho + \rho \cdot v^2) = -\rho \cdot g \cdot \sin \alpha + \frac{2 \cdot \tau_{\text{тр}}}{R}, \quad (1)$$

- неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = -\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial z}, \quad (2)$$

- энергии

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot q(t)}{\rho \cdot c \cdot F} + \frac{v}{c} \cdot \frac{dh}{dz}, \quad (3)$$

где:

$$q(t) = \frac{\lambda_1}{2 \cdot \pi \cdot R} \int_0^{\pi} \frac{\partial t_1}{\partial r} \Big|_{r=R} dr, \quad (4)$$

- центробежных насосов

$$H_n = H' - k_0 \cdot Q^{b_0}, \quad (5)$$

- теплопроводности изоляции

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \left( \frac{\partial^2 t_i}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t_i}{\partial r} \right), \quad (6)$$

$$R_i \leq r \leq R_{i+1}$$

- теплопроводности грунта

$$\frac{\partial t_{\text{гр}}}{\partial \tau} = a_{\text{гр}} \cdot \left( \frac{\partial^2 t_{\text{гр}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\text{гр}}}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

где:  $\rho, c$  и  $v$  - плотность, теплоемкость и скорость движения жидкости по трубопроводу;  $p$  и  $t$  - давление и температура;  $\tau$  - время;  $R, R_i$  - радиус трубы, изоляции, соответственно;  $x, y, z$  - координаты оси трубопровода;  $\alpha$  - угол наклона трубы к горизонту;  $\tau_{\text{тр}}$  - напряжение трения жидкости на стенке трубы;  $q(t)$  - тепловой поток через стенку трубы;  $F$  - площадь поперечного сечения трубы;  $h$  - потери энергии на трение;  $H_n, H'$  - напор центробежного насоса при подаче  $Q$  и нулевой подаче;  $k_0, b_0$  - эмпирические коэффициенты в (5);  $t, t_1, t_i$  и  $t_{\text{гр}}$  - температуры жидкости, стенки трубы, слоев изоляции и грунта;  $\lambda_1, \lambda_i$  и  $a_i, a_{\text{гр}}$  - соответственно коэффициенты теплопроводности и температуропроводности.

Таким образом, к простейшей системе 5-ти дифференциальных уравнений, описывающих гидродинамические процессы и теплообмен подземного трубопровода, добавляется еще одно уравнение напорной характеристики ЦБН

(5). Сопряженная задача в общем виде представляется системой уравнений (1 - 7), при соответствующих краевых условиях и условиях сопряжения.

В общем виде решение данной сопряженной задачи получить не представляется возможным. Аналитическое решение системы (1 - 7) весьма трудоемко даже при многочисленных допущениях. Упростить подход к решению данного класса задач можно, если использовать метод последовательной смены стационарных состояний.

Реализовать этот принцип возможно в аналитической постановке, с использованием ЭВМ и графоаналитическим способом. Не задаваясь целью изложить здесь полученные аналитические решения по определению времени прогрева трубопровода, времени безопасной остановки перекачки и др. в виду их громоздкости, сославшись на алгоритмы и соответствующие программы расчета на ЭВМ основных нестационарных процессов, рассмотрим графоаналитический метод решений сопряженных задач, используя динамические характеристики трубопроводной системы.

Следует отметить, что решение задач нестационарной теплопроводности с применением динамических характеристик были начаты в 70-х гг.[1]. Метод динамических характеристик успешно применялся для расчета нестационарных режимов нефтепроводов Оха-на-Сахалине-Комсомольск-на-Амуре и Узень-Шевченко, расчета безопасного времени остановки при транспорте бузачинских нефтей, на мазутопроводах Башкортостана и др.[2,3,4].

Этот способ расчета удобен для обсуждения, нагляден, позволяет при рассмотрении явлений глубже понять происходящие процессы и дать не только количественный, но и качественный анализ переходным процессам.

Решение уравнений (1 - 4, 6 - 7) дает величину потребного напора

$$H = \frac{P_k}{\rho \cdot g} + \Delta z + h(t) = \Delta z' + h(t) \quad (8)$$

для прокачки жидкости по трубопроводу в температурном режиме, определяемом тепловой инерцией окружающего массива, т.е. дифференциальным уравнением (7). Условие сопряжения на контуре трубы удобно задать тепловым потоком, полагая сбалансированность теплообмена, например, уравнением

$$q = Q \cdot \rho \cdot c \cdot \left( \frac{dt}{dz} \right)_R \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (5) и (8) дает параметры рабочей точки на рассматриваемый момент времени: подачу насосов  $Q$  и развиваемый ими напор  $H$ . Для стационарного режима это -  $Q_A$  и  $H_A$ ; для нестационарного -  $Q_{Bi}$  и  $H_{Bi}$ , см. рис. Баланс энергий в рабочей точке совмещенного графика:

$$h(t) + \Delta z' = H' - k_0 \cdot Q^{b_0} \quad (10)$$

Следует отметить, что для действующих нефтепроводов величину потерь энергии  $h(t)$  в уравнении (8) можно определять с учетом реального гидравлического сопротивления.

Нестационарную работу системы можно рассматривать как процесс перехода от одного устойчивого режима работы к другому. Режимы при нестационарных переходах определяются мгновенными характеристиками, которые перемещаются по полю  $H - Q$  насоса, а стационарная характеристика

трубопровода рассматривается как опорная, характеризующая устойчивый режим работы, к которому стремится система после любого возмущения. Поэтому, при определении области возможных подач  $Q_{\max} \div Q_{\min}$  необходимо рассматривать взаимное расположение насосных характеристик и характеристик трубопровода: стационарной и мгновенных.

Суть теплогидравлического расчета, например, прогрева системы, выражается в определении температур и построению на их основе мгновенных характеристик на каждый момент времени. По точкам пересечения  $V_i$  определяют потребный напор и сравнивают его с допустимым. Аналогично поступают, если учитывают температуру застывания перекачиваемой нефти или др. факторы.

### ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА "ГОРЯЧЕГО" ТРУБОПРОВОДА ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Отличительная особенность характеристики трубопровода для транспорта вязкопластичных жидкостей заключается в том, что она начинается не с нуля, а с некоторой величины статического напора при нулевой подаче. При работе насосов с малыми подачами потери напора в трубопроводе состоят из потерь на трение  $H_v$  и на преодоление предельного напряжения сдвига  $H_\tau$ .

$$h(t) = H_v + H_\tau. \quad (11)$$

По длине неизотермического трубопровода может сформироваться 4 характерных участка, отличающихся режимами течения и законами гидравлического сопротивления. Предлагаемая программа STAC учитывает такой вариант расчета. Потери энергии на вязкое трение определяются с учетом неизотермичности потока по сечению и по длине трубопровода. Для определения потерь энергии  $H_\tau$  с учетом линейной зависимости  $\tau'_0$  от температуры вида

$$\tau_0 = \tau_0^* \cdot \frac{t_y - t}{t_y - t_0} \quad (12)$$

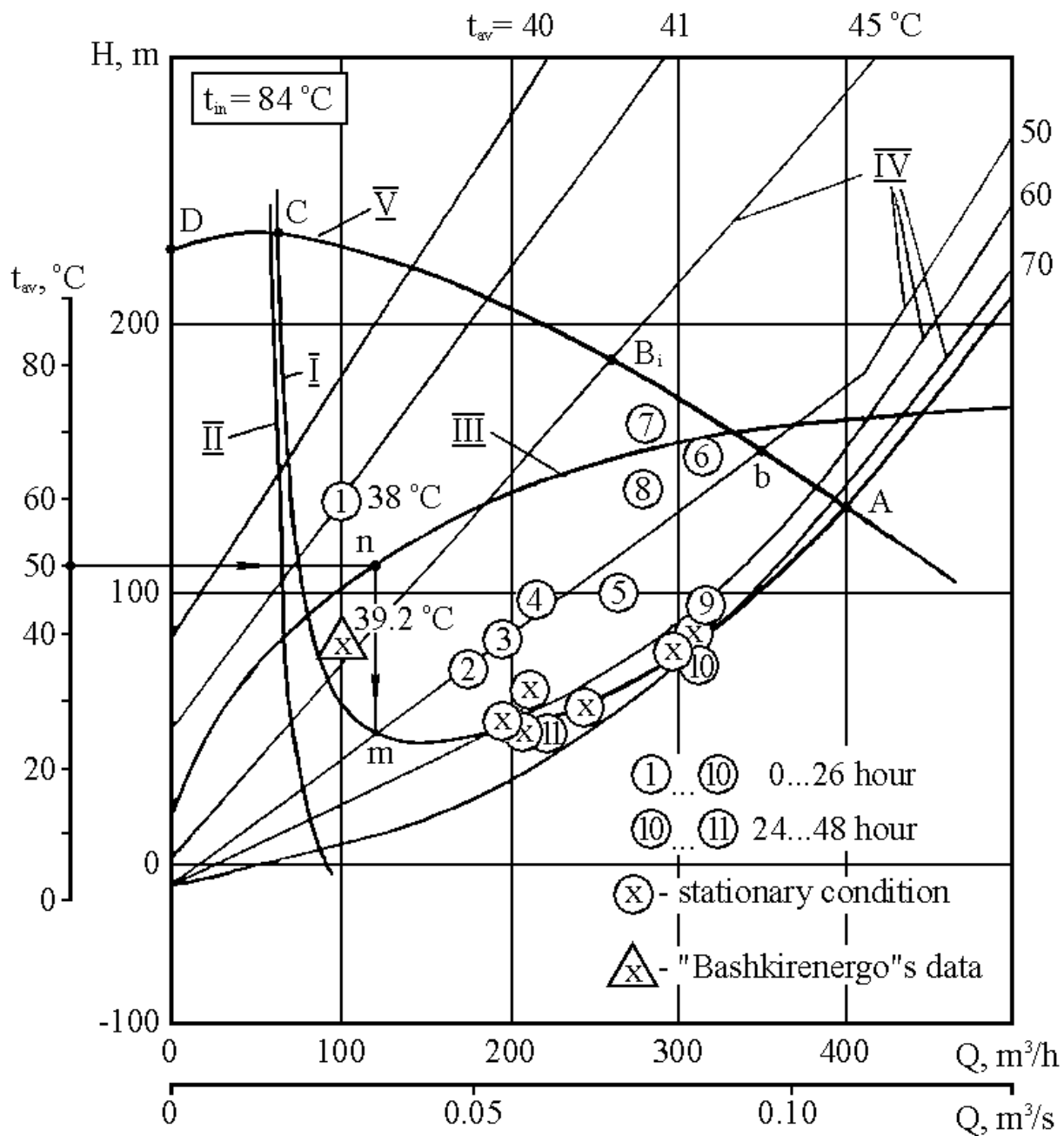
мы предлагаем формулу:

$$H_\tau = \frac{16 \cdot \tau_0^* \cdot L}{3 \cdot d \cdot Su} \left( \ln \frac{t_y - t_e}{t_k - t_e} + \frac{t_H - t_e}{t_y - t_e} - 1 \right), \quad (13)$$

$$\text{где: } Su = \ln \frac{t_H - t_e}{t_k - t_e},$$

$t_y$  – температура появления предельного напряжения сдвига,  $\tau_0^*$  – предельное напряжение сдвига при температуре  $t_e$  – грунта на глубине заложения трубопровода в ненарушенном тепловом состоянии;  $t_H$  и  $t_k$  – температура перекачиваемой жидкости в начальном и конечном сечении трубопровода;  $d$  и  $L$  – внутренний диаметр и длина трубопровода.

## Динамическая характеристика мазутопровода СНХК - СТЭЦ



- I – характеристика мазутопровода;
- II – статические напоры;
- III – кривая средних температур;
- IV – мгновенные характеристики;
- V – характеристика насоса 8НД-9х3.

Рис. 1

Программа STAC предусматривает также расчет потерь энергии  $N_\tau$ , если напряжение  $\tau_0$  определяется экспоненциальной зависимостью:

$$\tau_0 = \tau'_0 \cdot e^{-st} - y. \quad (14)$$

С увеличением подачи конечная температура жидкости повышается и при  $t_k \geq t_y$  значение  $N_\tau=0$ . На динамической характеристике, см. рис., кривая II - зависимость  $N_\tau=f(Q)$ . На график также наносятся мгновенные характеристики. Особенность построения мгновенной характеристики заключается в том, что необходимо каждый раз учитывать величину  $N_\tau$ , соответствующую данной средней температуре потока  $t_{cp}$ .

Построение мгновенной характеристики, например, для  $t_{cp}=50^\circ\text{C}$  показано на рис. Проводим горизонталь от оси температур до пересечения с кривой  $t_{cp}$  (Ш) - получаем т. п. Из т. п опускаем перпендикуляр до пересечения с кривыми II и I - получаем т. m, через которую и проводим мгновенную характеристику.

Зная положение мгновенной характеристики можно определить параметры работы насосов по т. b:  $Q_b = 350 \text{ м}^3/\text{час}$  и  $H_b = 155\text{м}$  на данный момент времени.

### **ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАЗУТОПРОВОДА СНХК - СТЭЦ. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ**

Метод динамических характеристик и апробирован на ряде промышленных трубопроводов. На динамической характеристике мазутопровода СНХК-СТЭЦ, рассчитанной на перекачку мазута М100 с температурой  $t_n=84^\circ\text{C}$ , приведено сопоставление с данными промышленного эксперимента летнего периода 1979 года, проведенного с целью изучения процессов остановки и последующего возобновления перекачки по трубопроводу мазута.

Длительность остановки составляла 72ч. Перед началом опыта грунт был хорошо прогрет, т.к. мазутопровод достаточно длительное время работал в стационарном режиме с  $Q=212\text{м}^3/\text{ч}$  и  $t_n=85^\circ\text{C}$ . На поле Q-H нанесены режимные точки, помеченные цифрами в следующем порядке: на момент "страгивания" т.1, развития нестационарного процесса – т.т.2...8 и стационарного режима – т.т.9...11.

Из рис. хорошо видно, что несмотря на малый расход  $Q=100\text{м}^3/\text{ч}$  в момент "страгивания", потери напора в трубопроводе велики и в 2 раза превышают потери при стационарном режиме. Это объясняется тем, что к моменту возобновления перекачки средняя температура мазута по данным замера  $t_{cp}=38^\circ\text{C}$ , что значительно ниже стационарной  $t_{cp}=47^\circ\text{C}$ . Совпадение с расчетом удовлетворительное. Так как параметры т.1 соответствуют мгновенной характеристике, построенной для  $t_{cp}=41^\circ\text{C}$ , то относительная погрешность  $\delta_t=(38-41)/38=-7,9\%$ .

С момента возобновления перекачки температура жидкости нарастает быстро, так как тепловая инерция грунта работает на восстановление режима. Режимные точки располагаются в области мгновенной характеристики на  $50^\circ\text{C}$ , затем  $60^\circ\text{C}$  и, наконец, ложатся на стационарную характеристику мазутопровода. Через 26ч с момента возобновления перекачки положение т.10, через 50 ч - т.11.

Точки, обозначенные "х", соответствуют стационарным режимам, получены в результате длительного наблюдения за состоянием мазутопровода в период с момента пуска в октябре 1978г. по 1983г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что метод динамических характеристик, предлагаемый для расчета нестационарных режимов "горячих" магистральных нефтепродуктопроводов, обладает следующими преимуществами по сравнению со стандартными методиками, в основе которых принято постоянство расхода  $Q = \text{const}$ :

1. При расчете нестационарных режимов работы магистрального трубопровода метод динамических характеристик позволяет учесть переменность подачи ЦБН с изменением гидравлического сопротивления трубопровода.

2. С помощью данного метода можно рассчитать темп изменения подачи центробежных насосов при пуске, прогреве трубопровода, остановке и возобновлении перекачки, снижении производительности, изменении температуры нагрева жидкости, закачиваемой в трубопровод, оперативно учитывать влияние климатических факторов и т. п. .

3. Динамическую характеристику можно построить для любой реологической модели жидкости, в том числе и для тиксотропной. Причем эффект от ее использования тем существеннее, чем сложнее модель.

4. Алгоритмы расчета нестационарных режимов нефтепродуктопроводов с помощью динамических характеристик хорошо реализуются на ЭВМ. Программы PROGR и BOST, составленные на языке OBJECT PASCAL в среде DELPHI, позволяют определить не только время прогрева трубопровода при пуске из холодного состояния и время безопасной остановки, но и пусковые параметры центробежных насосов при прогреве и с момента возобновления перекачки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гаррис Н.А. Применение динамической характеристики при теплогидравлическом расчете прогрева подземного трубопровода // РНТС ВНИИОЭНГ. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1976. – №7. – с. 7 – 8.

2. Методика расчета эксплуатационных режимов теплоизолированных мазутопроводов. Главнефлеснаб РСФСР // Отрасл. лабор. трубопр. транспорта. – Уфа: УНИ, 1979. – 79 с.

3. Методика теплогидравлического расчета мазутопроводов. Госкомнефтепродукт РСФСР. Отрасл. лабор. трубопр. транспорта. – Уфа: УНИ, 1982. – 55 с.

4. Тугунов П.И., Гаррис Н.А. Применение динамических характеристик для расчетов эксплуатационных режимов неизотермических трубопроводов // ОИ ВНИИОЭНГ. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. - 1985. – Вып. 3. – 60 с.