

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Изложен алгоритм расчета эксплуатационных теплогидравлических стационарных и нестационарных режимов неизоотермических нефтепроводов в осложненных условиях. Алгоритм позволяет рассчитать трубопровод, включающий несколько насосных станций, выполнить расчет по участкам (как надземным, так и подземным) по заданным интервалам температур, что значительно повышает точность расчетов, учесть смену режима перекачки, рассчитать внутренний коэффициент теплоотдачи, учесть влияние подкачек в основной трубопровод, расположенные по трассе тепловые станции. Данный алгоритм применим для жидкости с любой реологической моделью, апробирован на действующих магистральных и промышленных трубопроводах, имеет программное обеспечение.

The article presents an algorithm to calculate operating modes (both stationary and non-stationary) of non-isothermal oil pipelines in complicated conditions. The proposed algorithm is used for pipelines with several pump stations and for separate sections of pipelines (both surface and underground). Calculations can be made within a set temperature range which raises their accuracy. Besides, the algorithm takes into account operating mode change and the influence of additional pumps onto the main pipeline and thermal stations located along the pipeline. It also allows determining internal heat exchange factor. This algorithm can be applied to fluid of any rheological models. It was tested on real trunk and industrial pipelines. It is provided with a software package.

Практически все магистральные нефтепроводы неизоотермические. 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.

Как для «горячих», так и для просто неизоотермических 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.

Несмотря на сложность и громоздкость названных расчетов, их можно унифицировать и оперативно выполнить при помощи ЭВМ. Для этой цели на языке OBJECT PASCAL в среде Delphi была составлена программа Stac-di.

Программа Stac-di имеет удобный пользовательский интерфейс, рассчитана на работу в среде Windows (Windows 95, Windows NT и более современные версии), предназначена для расчета эксплуатационных теплогидравлических режимов «горячих» нефтепродуктопроводов методом динамических характеристик и позволяет:

- выполнить расчет по участкам как в подземном, так и в надземном вариантах;
- в пределах каждого участка учесть смену режима перекачки, турбулентного на ламинарный, если она происходит;
- в пределах каждого участка рассчитать составляющую, учитывающую пре-

дельное напряжение сдвига, если оно имеет место;

- рассчитать теплотери на надземном и подземном участках по различным алгоритмам;

- рассчитать внутренний коэффициент α_1 через критериальные зависимости на каждом участке, что значительно повышает точность теплогидравлического расчета при ламинарном режиме перекачки;

- рассчитать изотермические участки с температурой тепла трения выше температуры окружающей среды;

- учесть зависимость теплофизических свойств перекачиваемой жидкости – вязкости, плотности, теплоемкости и теплопроводности от температуры;

- повысить точность расчета за счет увеличения числа интервалов по температуре;

- учесть влияние подкачек в основной трубопровод, если они есть;

- учесть нагрев нефти в расположенных по трассе тепловых станциях;

- построить сетку мгновенных характеристик, характеристики насосов, по пересечению с которыми можно определить 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. Точность построения графиков задается пользователем.

Особенностью алгоритма программы теплогидравлического расчета является то, что потери энергии в трубопроводе на преодоление гидравлического сопротивления определяются как сумма потерь на трение h_v и статического напряжения сдвига $h_{то}$, что значительно упрощает расчет по сравнению с другими методиками*.

Основой теплогидравлического расчета является определение температуры жидкости t_{kj} в конце каждого намеченного участка

* Методика теплового и гидравлического расчета магистральных трубопроводов при стационарных и нестационарных режимах перекачки ньютоновских и не-ньютоновских нефтей в различных климатических условиях РД 39 – 30 – 139 – 79 / Миннефтепром. Уфа, 1979. 56 с.

трубопровода, потерь напора h_j на преодоление гидравлического сопротивления участков и потребного напора $H_{потр}$ для трубопровода в целом.

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

$$h_{vj} = \beta_j \frac{Q^{2-m_j} v_{*j}^{m_j}}{d_j^{5-m_j}} \frac{e^{u_j m_j (t_{*j} - t_{0j})}}{a_{\infty j}} \times \\ \times \left\{ \text{Ei} \left[-u_j \left(m_j - \frac{1}{3} \frac{K_j}{\alpha_{1j}} \right) (t_{*j} - t_{0j}) \right] - \right. \\ \left. - \text{Ei} \left[-u_j \left(m_j - \frac{1}{3} \frac{K_j}{\alpha_{1j}} \right) (t_{kj} - t_{0j}) \right] \right\}$$

где

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

β , m – коэффициенты в формуле Лейбенсона; u – крутизна вискограммы; $\text{Ei}[-x]$ – интегральная показательная функция от отрицательного аргумента.

Потери напора на преодоление предельного напряжения сдвига

$$\tau_0 = \tau'_0 e^{-st} - y$$

определяются по формуле

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

где τ'_0 , S , y – эмпирические коэффициенты; 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

$$H_{\text{потр}} = \Delta z + \frac{P_2}{\rho g} + (1,02 - 1,05) \sum_{j=1}^D (h_{vj} + h_{tj}).$$

Мгновенная характеристика – изотермическая, представляет собой графическую зависимость потерь напора от расхода на данный момент времени, при осредненных значениях $t_{\text{ср}}$ и $v_{\text{ср}}$ для всего трубопровода и используется при расчете нестационарных режимов.

Мгновенная характеристика строится с помощью «опорной» точки по формуле Лейбензона:

$$h = \beta \frac{Q^{2-m} v_{\text{ср}}^m L}{d^{5-m}}.$$

Программа Stac-di апробирована на мазутопроводе СНХК – Стерлитамакская ТЭЦ протяженностью 33 км, диаметром 426 мм. Трубопровод теплоизолирован, имеет надземный участок длиной 4,5 км.

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

Перед запланированной остановкой перекачки в течение недели теплогидравлический режим стабилизировался.

Ниже приводятся результаты расчетов, выполненных для условий летнего периода эксплуатации мазутопровода (с 16.06.79 по 23.06.79): $T_{\text{нэ}} = 84,9^\circ\text{C}$; $Q_{\text{нэ}} = 202 \text{ м}^3/\text{ч}$; $P_3 = 5,47 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $P = 6,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$;

$$\delta = \frac{P_3 - P}{P_3} \cdot 100 = -14,3.$$

Программа апробирована по данным одного из северных магистральных нефтепроводов. С помощью программы с учетом всех подкачек по трассе нефтепровода была найдена рабочая точка и при полученном расходе конечная температура по заданным участкам (см. таблицу).

Сравнение результатов расчета с действительными значениями на одном из северных магистральных нефтепроводов

Показатель	Данные по нефтепроводу	Результаты расчета	Погрешность, %
Расход, м ³ /с	0,47	0,46	2,1
Температура нефти, °C			
ГНПС	41,5	–	–
НПС 1	20,0	22,4	12
НПС 2	13,6	14,4	5,9
НПС 3	12,2	12,7	4,1
КП	11,3	11,1	1,8

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

Научный руководитель д.т.н. проф. *Н.А.Гаррис*