УДК 622.232.72 (088.8)

П.В.ПЯТИБРАТ
Ухтинский государственный технический университет

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ ПО ДЛИНЕ НЕФТЕПРОВОДА ВО ВРЕМЯ ПУСКА И ОСТАНОВКИ НПС

Эксплуатация нефтепровода с подогревом имеет свою специфику и проявляется, прежде всего, во влиянии на свойства нефти условий теплообмена трубопровода с окружающей средой. Состояние нефтепровода в значительной мере определяет технологию, конструктивные и проектные решения нефтепровода, сохранность окружающей природной среды, а также выбор эксплуатационных режимов. При этом требуется активно управлять тепловым состоянием нефтепровода.

Для решения большого числа таких задач, как прогнозирование теплового и гидравлического режимов в условиях изменения параметров эксплуатации, известны приближенные формулы, что недостаточно точно отражает реальную картину и не удовлетворяет решению поставленных задач. Предложенные методы прогнозирования наиболее полно отвечают современным требованиям.

The Usage of the oil pipeline with heating has its specifics and reveals itself, first of all, in influence upon characteristic of the oils of the conditions thermo exchange pipe line with surrounding ambience. The Condition of the oil pipeline in significant measure defines technology, constructive and design decisions of the oil pipeline, safety surrounding natural ambience, but in the same way choice of the working conditionses. Is it herewith required actively control the heat condition of the oil pipeline.

For decision of the large number of such problems, as forecastings heat and hydraulic mode in condition of the change parameter to usages known drawn near formulas for calculation of such processes that it is not enough exactly reflects the real picture and does not satisfy the decision of the put(deliver)ed problems. The Offered methods of the forecasting most packed answer the modern requirements.

Применительно к эксплуатации нефтепровода с подогревом специфика проявляется, прежде всего, во влиянии условий теплообмена трубопровода с окружающей средой на свойства нефти как транспортируемой среды и, как следствие, на основные технологические параметры.

В данной работе численными методами рассчитываются нестационарные неизотермические процессы, происходящие в магистральном трубопроводе. При этом предполагается, что сжимаемостью нефти и деформацией стенок трубопровода можно пренебречь, трубопровод надземный, теплопроводностью вдоль трубопровода пренебрегаем. Тогда задача сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений – неразрывности, движения, энергии:

$$Q_m = \rho v \omega = \text{const}(x);$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\lambda \rho v |v|}{2D}; \qquad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\pi K}{F\rho_н c_н}(T - T_0) + \frac{Q}{F\rho_н c_н}\frac{\partial p}{\partial x},$$

где Q и Q_m – объемный и массовый расходы; $\rho_н$ – плотность нефти; F – площадь поперечного сечения; v – скорость потока; p – давление; x – координата по оси x; λ – коэффициент гидравлического трения; $c_н$ – теплоемкость нефти; T_0 – температура окружающей среды; K – коэффициент теплопередачи; t – время.

Кроме того, ставятся начальные условия: распределение температуры и давления

в начальный момент времени, – и граничные условия: температура и расход нефти в начале нефтепровода. Давление в конце нефтепровода считается равным нулю. Зависимость вязкости нефти от температуры определялась по формуле Вальтера

$$\lg\left(\lg\left(10^6 \nu + a\right)\right) = b + c\lg(T). \qquad (2)$$

Коэффициент a принимается равным 0,8, коэффициенты b и c можно найти по значениям вязкости при двух температурах.

Коэффициент теплопередачи

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1 d_{\text{пар}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{пар}}}\ln\left(\frac{d_{\text{втр}}}{d_{\text{пар}}}\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2\lambda_{\text{тр}}}\ln\left(\frac{d_{\text{нтр}}}{d_{\text{втр}}}\right) + \frac{1}{2\lambda_{\text{из}}}\ln\left(\frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{нтр}}}\right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{из}}}\right)^{-1},$$

где $d_{\text{пар}}$ – внутренний диаметр парафина; $d_{\text{втр}}$ – внутренний диаметр трубопровода; $d_{\text{нтр}}$ – наружный диаметр трубопровода; $d_{\text{из}}$ – наружный диаметр изоляции; $\lambda_{\text{пар}}$, $\lambda_{\text{тр}}$, $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициенты теплопроводности парафина, трубопровода и изоляции; α_1 и α_2 – коэффициенты теплопередачи от нефти к парафину и от изоляции во внешнюю среду.

Коэффициенты теплопередачи вычисляются по числу Нуссельта Nu:

$$\alpha_1 = \text{Nu}\lambda_{\text{н}}/d_{\text{пар}}.$$

Для турбулентного течения при $\text{Re} > 10000$

$$\text{Nu} = 0{,}027\,\text{Re}^{0,8}\,\text{Pr}^{0,333}.$$

Для переходной зоны, для которой $\text{Re} = 2300 \div 104$, Рамм предложил следующую распространенную формулу:

$$\text{Nu} = 0{,}02\,\text{Re}^{0,8}\text{Pr}^{0,333}\left(1 - \frac{6\cdot 10^5}{\text{Re}^{1,8}}\right).$$

В зоне турбулентного течения и переходной зоне теплоперенос за счет конвекции протекает интенсивно, из-за чего для этих двух зон разность между температурой нефти по оси трубы и ее температурой у стенки трубы обычно не принимается в расчет. В ламинарных потоках интенсивность конвекционного теплопереноса значительно слабее. Однако, если жидкость подвергается принудительному перемещению, в ней также формируются струи свободной конвекции и они искажают конфигурацию профиля скоростей. Это искажение более значительно в вертикальных потоках, чем в горизонтальных. Для горизонтальных трубопроводов конвективный теплоперенос наиболее целесообразно характеризовать через произведение чисел Прандтля $\text{Pr} = \mu_{\text{н}} c_{\text{н}}/\lambda_{\text{н}}$ и Грасгофа Gr:

$$\text{GrPr} = \frac{d_{\text{пар}}^3\, c_{\text{н}}\, \rho_{\text{н}}\, g\, \beta_t \left(T_{\text{ос}} - T_{\text{ст}}\right)}{\nu\, \lambda_{\text{н}}},$$

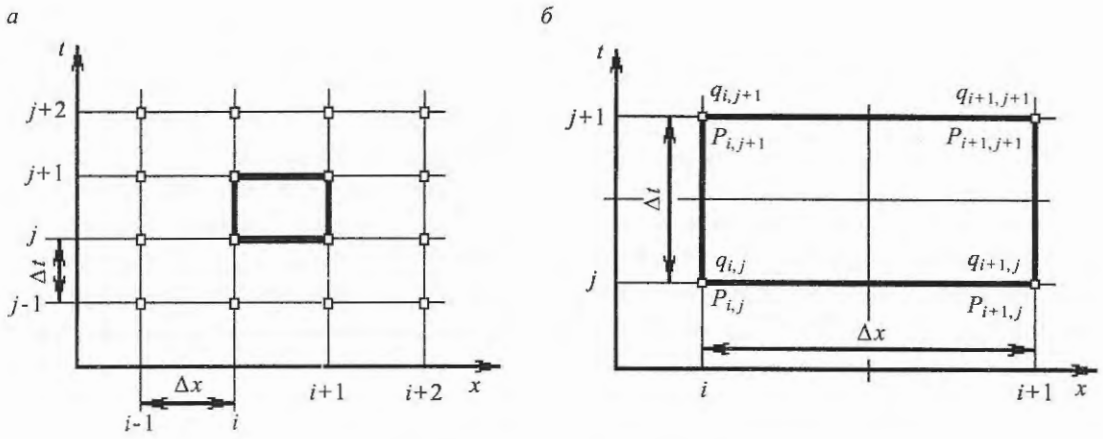
где $\lambda_{\text{н}}$ – коэффициенты теплопроводности нефти; β_t – коэффициенты температурного расширения нефти.

Для ламинарного течения отношение числа Nu к произведению GrPr можно определить по зависимости Джилла – Рассела. Если значение отсчета по оси абсцисс $\text{GrPr} > 5104$, $\text{Nu} = 0{,}184(\text{GrPr})^{0,32}$; при меньших значениях $\text{Nu} \approx 3{,}5$.

На температурный режим надземных нефтепроводов оказывают влияние большое число факторов, прежде всего условия конвекции на наружной поверхности. При полном штиле теплообмен происходит в условиях свободной конвекции и α_2 зависит от параметров, входящих в критерии Грасгофа и Прандтля. В другом предельном случае, т.е. при высокой скорости ветра, теплообмен в основном определяется вынужденной конвекцией и α_2 зависит преимущественно от числа Re. Коэффициент α_2 изменяется от 3 до 40 Вт/(м^2·°С). При больших значениях α_2 температура нефти мало зависит от пропускной способности и в основном определяется условиями внешнего теплообмена, а при малых значениях α_2 наоборот.

Для нахождения коэффициента теплопередачи α_2 необходимо рассмотреть теплоотдачу при поперечном обтекании цилиндра. Расчет средней теплоотдачи цилиндра, обтекаемого поперечным потоком газа, проводится по формуле

$$\text{Nu} = 0{,}43 + C\text{Re}^m\,\text{Pr}^{0,38}.$$



Изменяемые во времени скорости потока и давления линейных частей

Значения постоянных C и m следующие:

Re	1-4 103	4 103-4 104	4 104-4 103
C	0,55	0,20	0,027
m	0,5	0,62	0,80

Численные методы широко применяют для решения входящих в полную систему отдельных уравнений (упрощенная постановка) и интегрирования всей системы в целом. При численном решении системы частных дифференциальных уравнений (1) она преобразуется в решаемую систему алгебраических уравнений. Для преобразования применен метод конечных разностей.

Для решения систем дифференциальных уравнений в литературе описаны три метода: неявный, явный и метод характеристик. При расчете явным методом частные дифференциальные уравнения преобразуются в алгебраические уравнения, так что неизвестные давления и скорости потока в момент времени $t + dt$ зависят только от известных давлений и скоростей потока предшествующих этапов времени, которые позволяют нам найти их значения поодиночке, решением индивидуальных уравнений для них. Расчет неявным методом системы алгебраических уравнений дает результаты, содержащие неизвестные давления и скорости потока в момент времени $t + dt$ у граничных точек трубопровода только решением всей серии уравнений одновременно. После преобразований системы уравнений в обоих случаях могут быть или линейными, или нелинейными. Метод характеристик является в основном явным методом, сущность которого сводится к отысканию в плоскости $[x, t]$ таких направлений, вдоль которых частное дифференциальное уравнение может быть упрощено до дифференциального уравнения. Последнее можно решить численно методом конечных разностей.

Преобразуем систему частных дифференциальных уравнений в одно из алгебраических уравнений методом конечных разностей. Рассматриваемый отвод нефтепровода делим на части длиной dx. Изменяемые во времени скорости потока и давления линейных частей, получаемые таким образом, могут быть отнесены к узловым точкам решетки (см. рисунок, *а*), расстояние ячейки которой по длине равно dx, а по времени dt. На рисунке, *б* представлена одна ячейка, ограниченная точками решетки $(i; i + 1)$ по расстоянию и $(j; j + 1)$ по времени. Приближенные значения для численных производных в системах частных дифференциальных уравнений (1) для ячейки можно написать следующим образом:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{P_{i+1,\,j+1} + P_{i+1,\,j} - P_{i,\,j+1} - P_{i,\,j}}{2\Delta x};$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1,\,j+1} + T_{i+1,\,j} - T_{i,\,j+1} - T_{i,\,j}}{2\Delta x};$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j+1} + T_{i+1,j+1} - T_{i,j} - T_{i+1,j}}{2\Delta t};$$

$$T = 0{,}25\left(T_{i,j} + T_{i+1,j} + T_{i,j+1} + T_{i+1,j+1}\right).$$

В начальный момент времени температура во всех точках $T_{i,0}$ известна. Из граничных условий известна температура в начале нефтепровода $T_{0,j}$, и $T_{0,j+1}$, тогда из системы уравнений можно найти температуру в точке $T_{1,j+1}$. Таким образом, можно рассчитать температуру во всех точках на новом временном шаге. Данные уравнения решались численными методами.

Программа расчета написана на языке PASCAL в среде Delphi 6. По результатам расчета программа строит графики распределения температуры по длине трубопровода и ее изменение с течением времени.

Научный руководитель к.т.н. доц. *П.В.Жуйко*