

**ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ТРУБОПРОВОДОВ.
ВОПРОС УЧЕТА НАГРЕВА НЕФТИ И ГАЗА В ТРУБОПРОВОДАХ**

Валеев А.Р.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет
e-mail: anv-v@yandex.ru*

Поднят вопрос об учете нагрева от трения нефти и газа в трубопроводе. Обсуждается неточность при его учете в современных расчетах и ее влияние на действующие нефтепроводы. Предложена принципиально новая модель распределения тепла в сечении трубопровода. Проанализирована модель на фоне результатов других экспериментов. Приведен уточненный тепловой расчет.

Ключевые слова: *нагрев от трения, тепловой режим, тепловой расчет, теплообмен, коэффициент нагрева от трения*

В основе расчетов трубопроводов лежит получение гидравлической характеристики трубопровода. Гидравлические режимы газопроводов и трубопроводов вязких нефтей во многом зависят от тепловых режимов. Тепловые режимы, в свою очередь, определяются гидравлическим состоянием потока. Поэтому тепловой расчет трубопровода является неотъемлемой частью проектирования.

Существующие модели трубопроводов часто не отражают достаточно точно состояние реальных трубопроводов. К примеру, анализ фактических данных эксплуатации нефтепровода «Ухта-Приводино-Ярославль» показывает, что погрешность расчетной модели достигает 35 % [1].

Таким образом, актуальной задачей трубопроводного транспорта является создание более точной модели и методики расчета, позволяющие полнее отображать реальные трубопроводы.

Одним из способов улучшения модели трубопровода является изучение тепловых режимов, а именно расширение знаний о нагреве нефти и газа от трения.

Автором статьи были замечены неопределенности при учете нагрева за счет трения, о которых будет рассказано ниже, предлагается способ их устранения за счет применения новой модели процесса.

Известно, что на температуру нефти при транспортировке оказывает существенное влияние сила трения. В расчетах нефтепроводов это учитывается из представления о том, что тепло от силы трения идет на нагрев нефти [2-3].

При расчете газопроводов принято считать, что трение газа о стенки трубы не влияет на температуру продукта, т.к. необратимые потери работы на трение в трубопроводе компенсируются внутренним теплообменом [4]. Иначе говоря, энергия газа, потраченная на преодоление силы трения, восполняется теплотой при выполнении работы против этой силы трения.

Трение флюида в трубопроводе, как физическое явление, должно происходить и учитываться при расчете нефтепровода, так и в газопровода, или не учитываться вовсе. Это приводит к расхождениям в идеях методик расчета и ставит вопрос об их совершенствовании.

Также исследования по нагреву жидкостей за счет трения [1,5] показывают, что экспериментальные данные не совпадают с расчетами.

Сделаем анализ учета трения в современных расчетах.

Обзор учета трения при расчете нефтепровода

При моделировании движения нефти по трубопроводу влияние трения учитывается при помощи диссипативного члена [2]. Дифференциальное уравнение тепловой энергии.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -w \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{4k}{\rho c_{po}} (T - T_0) + \frac{wgi}{c_{po}}, \quad (1.1)$$

где $\frac{wgi}{c_{po}}$ – диссипативный член;

w – скорость движения нефти;

c_{po} – изобарная теплоемкость нефти;

k – коэффициент теплопередачи от потока нефти в окружающую среду;

d – внутренний диаметр трубопровода;

T – температура, в сечении x ;

T_0 – температура окружающей среды;

$i = \frac{\lambda w^2}{2gd}$ – гидравлический уклон;

λ – коэффициент трения.

Считая движение нефти стационарным, уравнению (1.1) можно переписать в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4k}{wp dc_{po}}(T - T_0) + \frac{\lambda w^2}{2 dc_{po}} \quad (1.2)$$

Отметим, что если в нефтепроводах не учитывать теплоту от трения, то (1.2) преобразуется в уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4k}{wp dc_{po}}(T - T_0), \quad (1.3)$$

Решением последнего уравнения является формула Шухова. Ее можно уточнить поправкой Лейбензона, учитывающую тепло трения [3]:

$$T = T_0 + (T_H - T_0) \cdot e^{-Шуy} + b \cdot (1 - e^{-Шуy}), \quad (1.4)$$

где $b = \frac{Ggi}{k\pi d}$;

G – массовой секундный расход;

$$Шу = \frac{\pi kdL}{Gc_{po}} \text{ – коэффициент Шухова;}$$

L – длина трубопровода.

Обзор учета трения при расчете газопровода

В основе расчетов газопроводов лежит закон сохранения энергии потока сжимаемой среды, который является выражением первого начала термодинамики для движущихся частиц [4]. Его можно сформулировать следующим образом: изменение кинетической энергии и внутренней энергии частиц внутри контрольной поверхности при ее перемещении за некоторый промежуток времени равно работе всех внешних сил на этом перемещении, сложенный с подведенной тепловой энергией:

$$d(E_{кин} + U) = dW + dQ, \quad (2.1)$$

где $E_{кин}$ – кинетическая энергия (под кинетической энергией подразумевается обычное даваемое в механике определение этой величины – энергия движения среды, рассматриваемой как целое тело);

U – внутренняя энергия;

dW - сумма работ всех приложенных к частицам среды сил, внешних и внутренних;

dQ – подведенная к контрольному объему тепловая энергия.

Величина dW складывается из:

$$dW = dW_p + dW_g - dW_\tau + dW_{ex} \quad (2.2)$$

где dW_p - работа сил давления;

dW_g - работа массовых сил, в частности, силы тяжести;

dW_τ - работа сил трения;

dW_{ex} - подведенная внешняя механическая работа.

Увеличение тепловой энергии складывается в общем случае из двух частей: dQ_{ex} - внешней подведенной теплоты и из теплоты dQ_{in} , которое выделилось внутри контрольного объема в результате преобразования в тепло работы трения:

$$dQ = dQ_{ex} + dQ_{in} \quad (2.3)$$

Эта вторая часть тепловой энергии равна эквиваленту работы трения[4]:

$$dQ_{in} = dW_\tau \quad (2.4)$$

Перепишем (2.1) с учетом (2.2) и (2.3):

$$dE_{кин} + dU = dW_p + dW_g - dW_\tau + dW_{ex} + dQ_{in} + dQ_{ex} \quad (2.5)$$

И с учетом (2.4) получаем:

$$dE_{кин} + dU = dW_p + dW_g + dW_{ex} + dQ_{ex} \quad (2.6)$$

На участке трубопровода $dW_p=0$ и $dW_{ex}=0$. Таким образом, мы видим, что при расчетах газопроводов отсутствует влияние тепла трения.

$$dE_{кин} + dU = dW_g + dQ_{ex} \quad (2.7)$$

Здесь можно перейти от энергий и работ к соответствующим мощностям:

$$dE_{кин} = Gcdc \quad (2.8)$$

где c – скорость газа;

$$dU = Gc_p dT - Gc_p D_h dP \quad (2.9)$$

где D_h – коэффициент Джоуля-Томпсона;

c_p – изобарная теплоемкость газа.

$$dW_g = -Ggdz \quad (2.10)$$

$$dQ_{ex} = -\kappa d(T - T_0) dx . \quad (2.11)$$

Получаем:

$$Gcdc + Gc_p dT - Gc_p D_h dP = -Ggdz - \kappa d(T - T_0) dx \quad (2.12)$$

Как правило, слагаемыми $Gcdc$ и $Ggdz$ пренебрегают. Это выражение можно привести к виду:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4\kappa}{wpdc_{po}}(T - T_0) + D_h \frac{dP}{dx} \quad (2.13)$$

Видим, что температура газа не связана с теплотой трения.

Анализ эксперимента по нагреву нефти

В статье [5] Колосов Б. В. приводит результаты эксперимента по исследованию нагрева жидкости за счет трения при движении в трубопроводе, проведенного в Октябрьском филиале УГНТУ.

В эксперименте жидкость (керосин и трансформаторное масло) пропускали через трубки диаметром 1,27 и 1,8 мм под давлением 2,1 МПа. Температура измерялась термометрами, которые обеспечивали достоверность результатов с точностью 0,02 %. Условия эксперимента подобраны таким образом, что течение жидкости можно принять адиабатным.

Результаты опыта показали что при ламинарном движении повышение температуры за счет трения равняется 0,8 К, в то время как расчетное повышение температуры равняется 1,4 К. Однако при турбулентном режиме эксперимент и расчеты показывают одинаковые результаты – нагрев за счет трения равен 0,9 К. Судя по результатам эксперимента, повышение температуры жидкости при ламинарном ниже расчетного нагрев примерно на 50 %. Автором статьи [5] сделан вывод, что при ламинарном режиме наряду с малым среднемассовым нагревом жидкости необходимо учитывать разогрев пристенного слоя.

Вывод общего уравнения для нефте- и газопроводов

Рассмотрим следующую модель процесса передачи тепла от потока в окружающую среду. Разделим весь поток на 2 зоны – тонкий пристенный слой, обволакивающий шероховатости, и основной поток. Отмечаем, что между ними суще-

ствует определенное термическое сопротивление, обусловленное процессом теплоотдачи. Частицы флюида вблизи шероховатостей под действием сил трения теряют свою энергию. Соответственно в пристенном слое уменьшается энергия потока на dW_t . Работа сил трения преобразуется в теплоту dQ_{in} . Частицы флюида, принявшие это тепло, обладая повышенной энергией, переходят в основной поток. Таким образом, областью повышения температуры является основной поток. Из-за наличия сопротивления температура зон не сравнивается, и часть тепла трения остается в трубопроводе, часть выделяется в окружающую среду

Запишем уравнение тепловой энергии для основного потока. Окружающей средой для него будет пристенный слой с температурой T_1 :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4\alpha_1}{wpdc_{po}}(T-T_1) + \frac{\lambda w^2}{2dc_{po}} + D_h \frac{dP}{dx}, \quad (3.1)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от потока нефти к внутренней стенке трубопровода с температурой T_1 .

Температура внутренней стенки трубопровода описывается через:

$$0 = \frac{4\alpha_1}{wpd}(T-T_1) - \frac{4k_1}{wpd}(T_1-T_0) - \frac{\lambda w^2}{2d}, \quad (3.2)$$

где k_1 – коэффициент теплопередачи от внутренней стенки в окружающую среду.

Температура внутренней стенки складывается из теплообмена с потоком флюида, теплообменом с окружающей средой и потерь энергии флюида за счет трения.

Отмечаем, что коэффициент теплопередачи от потока флюида в окружающую среду равен:

$$\frac{1}{kd} = \frac{1}{\alpha_1 d} + \frac{1}{k_1 d} = \frac{1}{\alpha_1 d} + \frac{\ln \frac{d}{d_{sed}}}{2\lambda_{sed}} + \frac{\ln \frac{d_{ex}}{d}}{2\lambda_{st}} + \frac{\ln \frac{d_{is}}{d_{ex}}}{2\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_2 d} \quad (3.3)$$

где α_2 - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности трубы в окружающую среду;

d_{sed} , d_{ex} и d_{is} - соответственно диаметры живого сечения потока, внешней поверхности трубы и изоляции;

λ_{sed} , λ_{st} и λ_{is} – соответственно коэффициенты теплопроводности пристенных отложений стали и изоляции.

Из формулы (3.2) можно выразить T_1 :

$$0 = \frac{4\alpha_1}{wpd}(T - T_1) - \frac{4k_1}{wpd}(T_1 - T_0) - \frac{\lambda w^2}{2d};$$

$$T_1 = \frac{\frac{4\alpha_1}{wpd}T + \frac{4k_1}{wpd}T_0 - \frac{\lambda w^2}{2d}}{\frac{4\alpha_1}{wpd} + \frac{4k_1}{wpd}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + k_1}T + \frac{k_1}{\alpha_1 + k_1}T_0 - \frac{\frac{\lambda w^2}{2d}}{\frac{4(\alpha_1 + k_1)}{wpd}};$$

$$T_1 = T - \frac{k_1}{\alpha_1 + k_1}T + \frac{k_1}{\alpha_1 + k_1}T_0 - \frac{wpd}{4(\alpha_1 + k_1)} \cdot \frac{\lambda w^2}{2d};$$

$$T - T_1 = \frac{k_1}{\alpha_1 + k_1}(T - T_0) - \frac{wpd}{4(\alpha_1 + k_1)} \cdot \frac{\lambda w^2}{2d}.$$

Подставляем полученное значение $(T - T_1)$ в формулу (3.1):

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4\alpha_1}{wpdc_{po}} \left(\frac{k_1}{\alpha_1 + k_1}(T - T_0) - \frac{wpd}{4(\alpha_1 + k_1)} \cdot \frac{\lambda w^2}{2d} \right) + \frac{\lambda w^2}{2dc_{po}} + D_p \frac{dP}{dx};$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4}{wpdc_{po}} \cdot \frac{\alpha_1 k_1}{\alpha_1 + k_1}(T - T_0) + \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + k_1} \right) \frac{\lambda w^2}{2dc_{po}} + D_h \frac{dP}{dx}.$$

И, в конце концов, получаем:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4k}{wpdc_{po}}(T - T_0) + D_h \frac{dP}{dx} + \frac{1}{\frac{\alpha_1}{k_1} + 1} \frac{\lambda w^2}{2dc_{po}},$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{4k}{wpdc_{po}}(T - T_0) + D_h \frac{dP}{dx} + k_\lambda \frac{\lambda w^2}{2dc_{po}}, \quad (3.4)$$

где ввели коэффициент нагрева от трения:

$$k_\lambda = \frac{1}{\frac{\alpha_1}{k_1} + 1} \quad (3.5)$$

Физический смысл этого коэффициента заключается в том, что коэффициент показывает, какая часть выделившейся теплоты от трения идет на нагрев потока.

Для газов величина α_l достигает порядка 10^9 , и соответственно коэффициент k_λ стремится к нулю, и трением можно пренебречь, поскольку погрешность при таком α_l будет составлять всего-то порядка 10^{-8} - $10^{-9}\%$. Тогда уравнение (3.4) для газов преобразуется в уравнение (2.13).

Для нефтепроводов при ламинарном течении вязких нефти величина α_l может не превышать единицы. Тогда коэффициент k_λ может принимать существенные значения - от 0,1 и более, что будет характеризовать нагрев нефти вследствие трения. Отмечаем, что при k_λ , стремящемся к единице, и $D_h=0$ уравнение (3.4) преобразуется в уравнение (1.3) для нефтепроводов.

Оценим последнее слагаемое в уравнении (3.4) для нефтепроводов по отношению к первому.

$$\frac{4k}{\nu \rho d c_{po}} (T - T_0) \approx \frac{4 \cdot 2 \frac{Вт}{м \cdot К}}{2 \frac{м}{с} \cdot 900 \frac{кДж}{м^3} \cdot 1 м \cdot 2100 \frac{Дж}{кг \cdot К}} \cdot 5К \approx 10,5 \cdot 10^{-6} \frac{К}{м};$$

$$k_\lambda \frac{\lambda w^2}{2 d c_{po}} \approx k_\lambda \frac{0,03 \cdot \left(2 \frac{м}{с}\right)^2}{2 \cdot 1 м \cdot 2100 \frac{Дж}{кг \cdot К}} \approx k_\lambda \cdot 28,6 \cdot 10^{-6} \frac{К}{м}.$$

Видно, что при значительном k_λ нельзя пренебрегать трением. При $k_\lambda \approx 1$ эффект нагрева трения имеет тот же порядок, что теплообмен с окружающей средой. Рассмотрим движения нефти с параметрами $Re < 2300$ и $Gz < 10$:

$$\alpha_1 = 3,66 \frac{\lambda_0}{d} \approx 3,66 \frac{0,16 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}}{1 м} \approx 0,6.$$

Для нефтепровода с изоляцией толщиной 5 см:

$$k_1 = \frac{1}{d} \left(\frac{\ln \frac{d}{d_{sed}}}{2\lambda_{sed}} + \frac{\ln \frac{d_{ex}}{d}}{2\lambda_{st}} + \frac{\ln \frac{d_{is}}{d_{ex}}}{2\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{is}} \right)^{-1} \approx \frac{1}{1 м} \left(0 + 0 + \frac{\ln \frac{1 + 2 \cdot 0,05}{1}}{2 \cdot 0,1 м} + 0 \right)^{-1} = 2,1$$

Таким образом

$$k_\lambda = \frac{1}{\frac{0,6}{2,1} + 1} \approx 0,8.$$

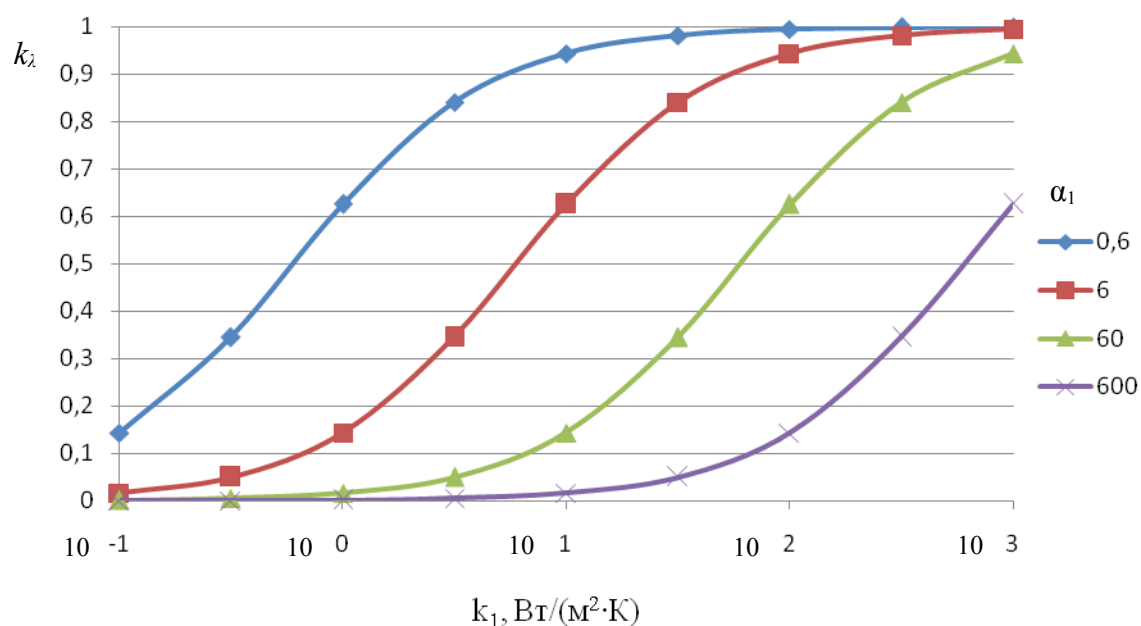


Рисунок 1. График зависимости k_2 от k_1 при различных значениях α_1

Из графика и таблицы видно, что чем лучше отвод тепла от трубопровода (коэффициент теплопередачи k_1), тем больше влияние трения на температуру нефти (коэффициент k_2). Также, чем выше число Рейнольдса Re нефти, тем выше α_1 , соответственно тем ниже k_2 , поскольку в общем случае α_1 по Новоселову В.В. [6] находится как:

При $Re_0 < 2320$ и $Gz > 10$:

$$\alpha_1 = 1,86 \frac{\lambda_0}{d} Re_0^{0,33} Pr_0^{0,33} \left(\frac{d}{L} \right)^{0,33} \left(\frac{v_0}{v_{st}} \right)^{0,14}.$$

При $Re_0 < 2320$ и $Gz < 10$:

$$\alpha_1 = 3,66 \frac{\lambda_0}{d}$$

При $Re_0 > 2320$:

$$\alpha_1 = 0,027 \frac{\lambda_0}{d} Re_0^{0,8} Pr_0^{0,33} \left(\frac{v_0}{v_{st}} \right)^{0,14}.$$

Отметим, что трение имеет наибольшее влияние на морские трубопроводы, которым соответствуют высокие значения k_1 .

Апробация методики с использованием коэффициента нагрева от трения на основе результатов эксперимента[5]

Для эксперимента рассчитаем значение коэффициента нагрева от трения k_λ и рассчитаем повышение температуры и сравним результаты с результатами исходной методики. Расчеты будем проведены для опыта с ламинарным движением жидкости ($Re = 160$).

Рассчитаем коэффициент внутренней теплоотдачи α_1 :

$$\alpha_1 = 3,66 \frac{\lambda_0}{d} = 490 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

В данном случае можно принять $k_1 = \alpha_1$. Однако точно рассчитать здесь α_2 не представляется быть возможным, поэтому этот коэффициент оценим с помощью формулы [7]:

$$\alpha_2 = 0,43 \frac{\beta_\varphi \cdot Re^{0,5} \cdot \lambda_\varphi}{d} = 703 \frac{Вт}{м^2 \cdot К},$$

где β_φ – поправочный коэффициент рекомендуемое значение 0,821;

λ_φ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Таким образом:

$$k_\lambda = \frac{1}{\frac{\alpha_1}{k_1} + 1} = \frac{1}{\frac{490}{703} + 1} = 0,59.$$

Получаем расчетное значение повышение температуры за счет трения вместо $1,4К$ значение $1,4К \cdot k_\lambda = 0,83К$. Получается, что вводя коэффициент нагрева от трения мы снижаем погрешность с 75 % до 4 %. Таким образом ввод коэффициента нагрева от трения повышает точность расчета температур. Рекомендуется его использовать при расчете ответственных трубопроводов.

Выводы

1. Полученное уравнение (3.4) полнее отображает движение нефтепродуктов.
2. Движение нефти и газа по трубопроводам можно считать по обобщенному уравнению для флюида (3.4), которое находит соответствие между опытами и расчетами.

3. Влияние трения на температуру газа пренебрежимо мало, и расчет следует вести по уже известным формулам, например по формуле (2.13)

4. Влияние трения на температуру нефти существенно и может превышать эффект от теплопередачи с окружающей средой.

5. При расчете нефтепроводов следует использовать формулу Шухова-Лейбензона, уточненную коэффициентом тепла трения k_λ :

$$T = T_0 + (T_H - T_0) \cdot e^{-Шу} + k_\lambda \cdot b \cdot (1 - e^{-Шу}),$$

где $b = \frac{Ggi}{k\pi d}$;

G - массовой секундный расход;

$$Шу = \frac{\pi kdL}{Gc_{\rho_0}} - \text{коэффициент Шухова};$$

L - длина трубопровода;

$$k_\lambda = \frac{1}{\frac{\alpha_1}{k_1} + 1} - \text{коэффициент тепла трения.}$$

6. Чем меньше число Рейнольдса Re , тем больше влияние трения на температуру флюида. Наибольшее влияние тепла трения будет наблюдаться при ламинарном движении вязких нефтей в морских нефтепроводах.

Литература

1. Байкова Л.Р. Прогнозирование технологических параметров нефтепроводов в усложненных условиях эксплуатации. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа. 1997. 201 с.

2. Фунг Динь Тхык, Каримов М.Ф., Заримов З.Ф. Компьютерное моделирование термодинамических и технологических процессов в действующих подводных нефтепроводах // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2001. №3. С. 45-55.

3. Ким Д.П., Рахматуллин Ш.И. О тепловом расчете магистральных нефтепроводов // Нефтяное хозяйство. 2006. №1. С. 104-105.

4. Чарный И.А. Основы газовой динамики. М.: Гостопттехиздат 1961. 199с.

5. Колосов Б.В. Исследование нагрева жидкости за счет трения при движении ее в трубопроводе // Нефтяное хозяйство. 1986. №10. С. 51-52.

6. Новоселов В.В. Тепловые режимы магистральных трубопроводов в сложных геогидрологических условиях. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа. 1998. 237 с.

7. Ивашкевич А.А. Расчет тепловых потерь неизолрованными трубопроводами при надземной прокладке: Методические указания. 1998. URL: http://tgv.khstu.ru/downloads/my_teplopoteri1998.pdf (дата обращения 14.03.2009).