

МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО СБОРУ, ПЕРЕКАЧКЕ
И ТРАНСПОРТУ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ (ВНИИСПНефть)

Московский институт нефти и газа имени И.М. Губкина.

УТВЕРЖДЕН

Начальником технического Управления
Миннефтепрома

Ю.Н. БАЙДИКОВЫМ

" _____ " _____ 198 г.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С
ЭЛЕКТРОПОДОГРЕВОМ ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ
И НЕФТЕПРОДУКТОВ (временный)

Уфа, 1987г.

Методика предназначена для выполнения тепловых и гидравлических расчетов перекачки нефти и нефтепродуктов по теплоизолированным трубопроводам с применением электроподогрева. Она содержит основные сведения об устройствах электроподогрева, их классификацию и указания об основных ограничениях для применения устройств.

Приведены формулы для расчетов параметров электроподогрева трубопровода в процессе движения нефти и при возобновлении перекачки после остановки.

В разработке методики участвовали:

МИНГ им. И.М.Губкина:

Зав. ОНТИЛ транспорта нефти,

профессор Марон В.И.,

мл.науч.сотр. Гарина-Янычева Н.А.

мл.науч.сотр. Рыкин С.Ю.

ВНИИСПТ нефть г. Уфа

ВНИИнефть

Зав.лаборатории 444

ст.науч.сотр. Миркин А.В.

науч.сотр. лаборатории 412 Скоробогатов Б.И.

МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

МИНГ им. И.М.Губкина

ВНИИСПТнефть г.Уфа

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Методика расчета параметров и оптимальных режимов
эксплуатации теплоизолированных трубопроводов с
электроподогревом для перекачки высоковязких неф-
тей и нефтепродуктов (временный)

РД _____

Уфа 1987г.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Методика расчета параметров и оптимальных режимов эксплуатации трубопроводов с электрообогревом для перекачки вязкообразных нефтей и нефтепродуктов.

/I-ая редакция/

Вводится впервые

Приказом Министерства

Срок введения установлен с _____

Срок действия до _____

Предлагаемая методика позволяет производить тепловые и гидравлические расчеты трубопроводов с электрообогревом любой протяженности. Методика содержит основные сведения об устройстве электроподогрева нефти, приведена их классификация, указаны основные ограничения для применения каждого из них. Приведены формулы для расчета параметров электроподогрева трубопровода, оптимальных с точки зрения затрат энергии на подогрев нефти перед началом движения и в процессе движения по трубопроводу.

Условные обозначения.

- Q - объемный расход нефти, $\text{м}^3/\text{с}$;
 d - диаметр трубопровода /наружный/, м ;
 L - длина трубопровода, м ;
 ΔP - перепад давления на обогреваемом участке, $\text{Н}/\text{м}^2$;
 μ - динамическая вязкость нефти, $\text{Н}/\text{м}\cdot\text{с}$;
 ν - кинематическая вязкость нефти, $\text{м}^2/\text{с}$;
 λ_n - коэффициент теплопроводности нефти, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$;
 ρ - плотность нефти, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 ρ_i - плотность изоляции, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 c - удельная массовая теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{град}$;
 τ_0 - начальное напряжение сдвига, $\text{кгс}/\text{см}^2$;
 T_x - начальная температура нефти перед разогревом, К , $^{\circ}\text{C}$;
 T_n - температура нагрева нефти, К , $^{\circ}\text{C}$;
 θ - температура электронагревательного устройства, К , $^{\circ}\text{C}$;
 t^* - время оптимального электроподогрева, с ;
 \hat{t} - время прогрева нефти до температуры T_n , с ;
 λ_i - коэффициент теплопроводности изоляции, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$;
 $(\rho c)_i$ - теплоемкость единицы объема изоляции, $\text{Дж}/\text{м}^3\cdot\text{град}$;
 $(\rho c)_l$ - теплоемкость единицы объема ленты, $\text{Дж}/\text{м}^3\cdot\text{град}$;
 $(\rho c)_m$ - теплоемкость ^{единицы} объема металла трубопровода, $\text{Дж}/\text{м}^3\cdot\text{град}$;
 δ - толщина стенки трубопровода, м ;
 h - толщина нагревательной ленты, м ;
 H - сумма толщин нагревательной ленты и стенки трубы, м ;
 q^x - поток тепла, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 P - мощность нагревательного устройства на единицу его длины, $\text{Вт}/\text{м}$;
 N - число нагревателей;
 ℓ - шаг намотки спиральной укладки ленты, м ;
 T_i - температура изоляции, К ;
 α_n - коэффициент теплоотдачи в ядро потока, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{град}$;

- U - скорость перекачки нефти, м/с;
 T_0 - температура окружающей среды, °С;
 d - коэффициент теплоотдачи от трубопровода в окружающую среду,
Вт/м²·град;
 A_x - показатель кривизны вязкограммы.

1. Общие положения

1.1. Для поддержания температуры высоковязких нефтей и нефтепродуктов, высокопарафинистой нефти при перекачке при температурах окружающей среды, ниже температуры их застывания технология транспорта предусматривает использование электрообогревательных устройств.

1.2. Использование электрообогревательных устройств дает возможность автоматизировать процесс регулирования температурного режима перекачки нефти.

1.3. Электрообогревательные устройства особенно эффективны при периодической потребности в подогреве. Их можно в нужное время включать и выключать в зависимости от температурных условий внешней среды, или при разогреве застывшего нефтепродукта из-за остановки перекачки.

1.4. В теплоизолированном трубопроводе с электрообогревательным устройством проложенным вдоль образующей трубопровода или намотанного спирально на него под слоем теплоизоляции, для возобновления перекачки необходимо прогреть слой нефти в окрестности внутренней поверхности трубопровода. Этого оказывается достаточно чтобы возобновить перекачку и продолжать ее.

1.5. В связи с этим возникают следующие задачи: Определить оптимальную температуру нагревательного устройства, распределение температуры транспортируемой среды, потери напора в трубопроводе

с целью снижения энергозатрат на перекачку; найти такое управление процессом нагрева нефти, чтобы к заданному моменту времени обеспечить заданную температуру при минимальных затратах энергии на подогрев с учетом ограничений на мощность электрообогревательных устройств.

Раздел 2.

Классификация обогревательных устройств.

2.1. Системы электрообогрева трубопроводов можно разделить на две основные группы: системы прямого обогрева, в которых ток пропускается непосредственно по обогреваемому трубопроводу; системы косвенного обогрева, в которых используются нагреватели, намотанные на поверхность трубопровода или проложенные по его образующей.

2.1.2. Различные методы электрообогрева можно классифицировать в соответствии со схемой изображенной на рис.1.

2.1.3. Индукционный электрообогрев осуществляется током высокой частоты, который пропускается по проводнику, намотанному на поверхность трубы. При этом необходимо тщательно выполнять электроизоляцию.

При использовании индукционного метода достигается высокая мощность, зависящая от числа витков и частоты тока. Из-за высокой стоимости метод индукционного электрообогрева не нашел широкого применения.

2.1.4. При импедансном способе электрообогрева переменное напряжение от однофазного трансформатора подводится к концам обогреваемого участка. При этом трубопровод является проводником тока.

По требованию техники безопасности напряжение тока не должно превышать 36 в. Максимальная длина трубопровода, обогреваемого одним источником тока, составляет 900-1200 м.

2.1.5. Для косвенного обогрева используются нагревательные кабели. Наибольшее распространение получили кабели с минеральной

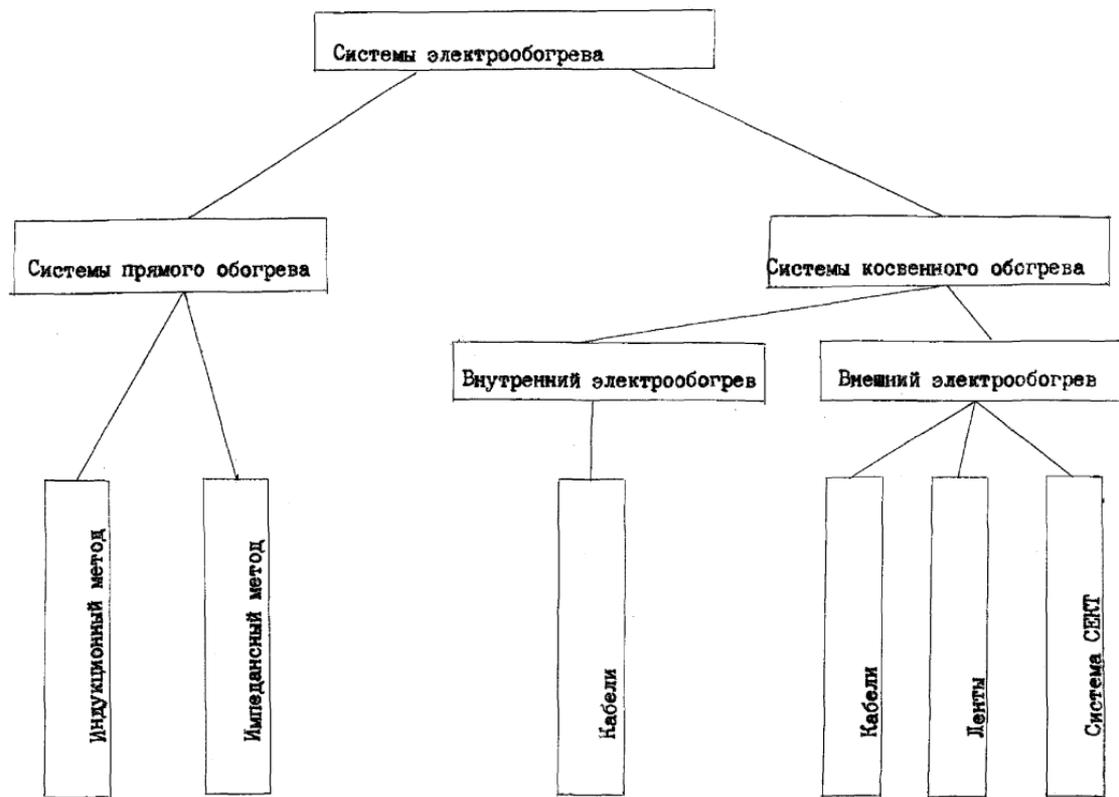


Рис.1.

изоляция и металлической оболочкой - кабели МИ. Выпускаются кабели в медной и стальной оболочках /ГОЖ/, /КНМС/. При температурах не более 200° применяются кабели в медной оболочке, до 400°С - углеродистая сталь и до 800° - нержавеющая сталь. При температурах до 50° используется нагревательный кабель КНКРВ - 85 - 47/380 ТУ 63 РСЯСР - 5 - 28.

Кабели прокладываются либо внутри трубы по ее оси либо снаружи трубопровода. Кабели применяются до обогрева участков длиной 5-8 км.

2.1.6. Наиболее универсальная система косвенного электрообогрева - гибкие ленточные нагреватели.

2.1.7. Существуют два типа ленточных нагревателей:

тип ЭНГЛ-180 /элемент нагревательный, гибкий, ленточный/

тип НТЛ /нагреватель теплостойкий ленточный/.

2.1.8. Технические данные нагревателей ЭНГЛ приведены в таблице I.

Таблица I.

Технические данные нагревателей.

| Технические данные | тип нагревателей | | |
|--|------------------|------------|--------------|
| | ЭНГЛ-180 | ЭНГЛВ-180 | ЭНГЛ-180Х/12 |
| Номинальное напряжение, В | 220 | 220 и 380 | 36 и 220 |
| Удельная мощность, Вт/м | 40-100 | 30-100 | 40-100 |
| Номинальная мощность, кВт | 0,17-2,10 | 0,143-2,10 | 0,11-2,10 |
| Электричес, сопротивление изоляции /не менее/, М Ом: | | | |
| - в холодном состоянии | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| - в рабочем состоянии | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Длина, м | 2,55-33,12 | 2,48-38,17 | 1,7-33,12 |
| Ширина, мм | 30-33 | 30-41 | 30-41 |

2.1.9. Технические данные нагревателей НТЛ приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Технические данные гибких нагревательных лент типа НТЛ.

| Технические данные | |
|--|-----------|
| Номинальное напряжение, В | 220 и 380 |
| Удельная мощность, Вт/м | 150-360 |
| Номинальная мощность, кВт | 1,02-5,45 |
| Электрич. сопротивление изоляции /не менее/ М Ом | |
| - в холодном состоянии | 1,0 |
| - в рабочем состоянии | 0,5 |
| Длина, м | 4,3-23,4 |
| Ширина, мм | 22 |
| Толщина, мм | 2,5 |
| Масс, кг | 0,84-2,1 |

2.10. Существуют две конструкции гибких нагревателей ЭНГЛ-180, ЭНГЛВ-180, ЭНГЛ-180 ХЛ2:

- без токоведущих проводов /для индивидуального подключения/ -
- исполнение И: с тонковедущими проводами / для последовательного подключения/ - исполнение П.

2.11. Пример записи условного обозначения нагревателя марки ЭНГЛ-180 мощностью 1,63 кВт, с номинальным напряжением 220 В, исполнения П и длиной активной части 27,12 м - ЭНГЛ-180-И, 63/220 27,12.

2.127 Пример записи условного обозначения нагревателя марки НГЛ-400 с номинальным напряжением 220 В, удельной мощностью 150 Вт/м для активной части 13,52 м - НТЛ-400-220-150-13,52.

2.13. Нагреватели ЭНГЛ в исполнении П допускают последовательное воединение в цепи до 130 м и мощностью до 5,5 кВт.

2.14. Нагреватели ЭНГЛ имеют герметизирующую оболочку из кремнийорганической резины.

2.15. У нагревателей ЭНГЛ-180 и ЭНГЛ-180 ХЛ2 каждая нихромовая жила – проводник тока оплетена и окружена стеклонитью. Эти нагреватели предназначены для использования в районах Крайнего Севера.

2.16. Нагреватели НТЛ-400 и НТЛ-600 не имеют герметизирующего покрытия.

2.17. Гибкие нагреватели прокладываются вдоль обогреваемого участка трубопроводов двумя способами: по спирали и вдоль образующей / линейный способ/.

2.18. Линейный способ может быть многорядным /несколько нагревательных лент вдоль образующей/ и включать резервные нагревательные ленты, используемые при необходимости для увеличения мощности подогрева.

2.19. Спиральный способ допускает намотку с различным шагом вдоль образующей, что позволяет регулировать мощность подвода тепла.

2.20. За рубежом применяется система СЕКТ

2.21. Система СЕКТ представляет собой вспомогательную трубу диаметром 19–25 мм, внутри которой помещается изолированный медный проводник и которая приваривается перывистым швом по всей длине основного трубопровода.

2.22. Трубопроводы заземляются каждые 150–300 м.

2.23. Отсутствие потенциала источника на трубопроводе с применением систем СЕКТ позволяет использовать для питания нагревателей напряжение от 1000 В до 10000 В. Максимальная длина трубопровода обогреваемого одним источником питания от 1200 до 40000 м и более.

2.24. Удельная мощность, выделяемая трубчатым коаксиальным электронагревателем составляет в среднем от 50 до 170 Вт/м, что

соответствует токам от 150 до 300 А, для кратковременных режимов работы, этот диапазон может быть расширен до 400–450 Вт/м /или до 450–500 А/.

2.25. С увеличением диаметра обогреваемого трубопровода количество электронагревательных устройств возрастает от одного при диаметре до 150 мм до шести при диаметрах 600–800 мм.

2.26. Для теплоизоляции трубопроводов с электроподогревом применяют теплоизоляционные материалы из минеральной и стеклянной ваты и волокна.

2.27. Технические характеристики изоляции приведены в таблице 2.

Таблица 2.

| Наименование конструкции и материалов | Размеры, мм | | | Плотность кг/м ³ | Коэффициент теплопроводности Вт/мград |
|---|-------------|--------|----------------------------|--------------------------------|--|
| | длина | ширина | толщина на внутр. диаметра | | |
| Плиты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем /ГОСТ 9573-72/ | 1000 | 500 | 40 | 50,75 | 0,0465 |
| | | | 50 | 100,125 | 0,049 |
| | | | 60 | 150 | 0,051 |
| Маты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем /ГОСТ 9573-72/ | 2000 | 500 | 70–80 | 50–75 | 0,0465 |
| | 3000 | 1000 | 90–100 | 100–150 | 0,049 |
| | 4000 | 108 | 40 | 150 | 0,0515 |
| | | | 60 | | |
| Полуцилиндры теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем /ГОСТ 23208-78/ | 500 | 57 | 40 | 100 | 0,0465 |
| | | | 76 | 150 | 0,051 |
| | | | 89 | 60 | |
| | 1000 | 108 | 40 | 200 | 0,0535 |
| | | | 60 | | |
| Цилиндры полые теплоизоляционные из минеральной | 500 | 57 | 30;40 | 150 | 0,051 |
| | | 76 | 50 | | |

| | | | | |
|------|-----|----|-----|-------|
| 750 | 108 | 40 | 200 | 0,053 |
| | 133 | 50 | | |
| | 159 | 60 | | |
| 1000 | 219 | 50 | 250 | 0,056 |
| | 273 | 60 | | |

2.28. В качестве оболочек изоляции используются листы из алюминиевых сплавов, сталь тонколистная оцинкованная или кровельная, гибкие стеклопластинки, синтетические пленки и т.п.

2.29. Кроме того промышленность выпускает теплоизоляционные изделия из стекловолокна в виде матов и плит на синтетическом связующем и прошивных матов.

2.30. Технические данные теплоизоляционных изделий из стекловолокна

| | |
|--|------------|
| плотность, кг/м ³ | 35-170 |
| коэффициент теплопроводности Вт/м.град | 0,035-0,46 |
| стоимость руб/м ³ | 16-24 |

Стекловолокнистые изделия на синтетическом связующем используются при температурах до 180°C, а прошивные маты при температурах до 450°C.

2.31. Все более широкое применение находят теплоизоляционные конструкции из пено и поропластов

Технические данные изоляции из пено и поропластов:

| | |
|-------------------------------|-------------|
| Термостойкость °C | 140-150 |
| плотность, кг/м ³ | 40-200 |
| теплопроводность, Вт/м.град | 0,042-0,060 |
| стоимость, руб/м ³ | 100-150 |

Раздел 3.

Расчет параметров для выбора средств электроподогрева при возобновлении перекачки.

3.1. Расчет параметров для выбора средств электроподогрева производится следующим образом:

3.2. Поток тепла q^* при линейной прокладке нагревающего устройства равен

$$q^* = P \cdot N / \pi \cdot d$$

где P – мощность нагревательного устройства на единицу длины / см. паспортные данные/; N – число нагревателей; d – диаметр трубопровода.

3.3. Поток тепла q^* при спиральной прокладке равен

$$q^* = \frac{\sqrt{\pi^2 d^2 + l^2}}{\pi d l} \cdot P$$

где l – шаг намотки.

3.4. Температура нагревательного устройства косвенного подогрева и материала трубы при возобновлении перекачки определяются по формуле

$$\theta = T_0 + \frac{2q^* H \sqrt{\epsilon}}{\lambda_n} \left(1 - \frac{1 - \exp[-(\rho c)_0 \sqrt{\epsilon}]}{B(\rho c)_0 \sqrt{\epsilon}} \right), \quad (\rho c)_0 = \frac{(\rho c)_n}{\rho c}$$

$$B = 1 + \sqrt{\lambda_i(\rho c)_i / \lambda_n(\rho c)_n}$$

здесь θ – температура нагревательного устройства и материала трубы; T_0 – начальная температура нагревательного устройства и материала трубы; H – суммарная толщина материала трубы и нагревательной ленты или другого устройства; λ_n – коэффициент теплопроводности нефти; $(\rho c)_n$ – теплоемкость единицы объема нефти; ρc – суммарная теплоемкость материала трубы и нагревательной ленты или другого устройства

$$\rho c = (\rho c)_m \frac{d}{H} + (\rho c)_l \frac{h}{H}, \quad H = d + h$$

где $(\rho c)_m, (\rho c)_l$ - теплоемкость материала трубы и нагревательной ленты; d - толщина стенок трубы; h - толщина нагревательной ленты,

$$\tau = \frac{\lambda_H t}{(\rho c)_H H^2}$$

где t - время ^{от} начала нагрева.

3.5. Среднее по толщине зоны прогрева значение температуры нефти равно

$$\bar{T}_H = T_0 + \frac{q^* H \sqrt{\tau}}{\lambda_H} \left[1 - \frac{1 - \exp[-(\rho c)_0 \sqrt{\tau}]}{B (\rho c)_0 \sqrt{\tau}} \right]$$

3.6. С помощью формул п/п 3.4. и 3.5. можно вычислить температуру нагревательного устройства и нефти вблизи поверхности трубопровода, если заданы мощность нагревательного устройства q^* , число нагревателей N или шаг намотки l , время процесса ^{нагрева} t .

3.7. Мощность необходимая для прогрева нефти перед началом перекачки определяется по формуле

$$q^* = \frac{\lambda_H (\bar{T}_H - T_0)}{H \sqrt{\tau} F(\tau)}; \quad F(\tau) = 1 - \frac{1 - \exp[-(\rho c)_0 \sqrt{\tau}]}{(\rho c)_0 \sqrt{\tau} \cdot B}$$

3.8. Формулы п/п 3.5. и 3.7. вместе с формулами п/п 3.2 и 3.3. позволяют определить мощность устройства электрообогрева, если заданы температура нагрева T_H , время нагрева t , число нагревателей N или шаг намотки l , или определить число лент N и шаг намотки, если известна мощность q^* нагревательного устройства на единицу длины P .

Раздел 4.

Расчет температуры нагрева и времени подогрева для возобновления перекачки.

4.1. Выбор температуры нагрева и времени подогрева производится следующим образом:

4.2. Для возобновления перекачки необходимо прогреть слой нефти вблизи поверхности трубопровода.

4.3. При заданном перепаде давлений расход нефти с прогретым слоем определяется по формуле

$$Q = \frac{\pi d^3 \sqrt{\alpha_n t}}{8 \mu (\bar{T}_n)} \cdot \frac{\Delta P}{L}, \quad \alpha_n = \frac{\lambda_n}{(\rho c)_n}$$

здесь Q - расход на участке обогрева длиной L ; α_n - коэффициент температуропроводности нефти.

4.4. Зависимость μ от T_n представляется в виде

$$\mu = \mu_0 \exp[-a_x (\bar{T}_n - T_0)]$$

где μ_0 - вязкость при температуре T_0 ; a_x - показатель крутизны вязкограммы.

4.5. Если релогия нефти такова, что существенную роль играет начальное напряжение сдвига τ_0 , то перепад давления при котором начнется движение нефти равен

$$\frac{\Delta P}{L} \geq \frac{4}{d_{\text{вн}}} \tau_0$$

здесь τ_0 - предельное напряжение сдвига нефти, величина которого зависит от \bar{T}_n .

4.6. Формула п. 4.5. позволяет для известной зависимости τ_0 от \bar{T}_n и заданной величине \bar{T}_n найти перепад давления ΔP .

4.7. Если известна величина ΔP , то по формуле п.4.5. найдем τ_0 , при котором начнется движение.

4.8. Затем по известной зависимости ζ_0 от \bar{T}_H находим температуру нагрева \bar{T}_H .

4.9. Расход, который можно обеспечить при этой температуре, определяется по формуле:

$$Q = \frac{\pi d^4}{128 L \mu(\bar{T}_H)} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{4L \cdot \zeta_0}{d \Delta P} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{4L \cdot \zeta_0}{d \Delta P} \right)^4 \right]$$

4.10. Если задать Q , ΔP , \bar{T}_H , то можно найти время прогрева по формуле п.4.3.

4.11. Если задать Q , ΔP и время прогрева, то по формулам п.п.4.3. и 4.4. можно найти температуру нагрева нефти.

4.12. При известной температуре нагрева нефти \bar{T}_H можно найти температуру нагрева электронагревательного устройства по формуле

$$Q = 2 \cdot \bar{T}_H - T_*$$

здесь T_* - начальная температура нефти.

Раздел 5.

Определение оптимального времени электроподогрева для запуска нефтепровода

5.1. Пусть известны величины перепада давления ΔP , расхода Q , который желательно обеспечить путем прогрева нефти за время t до заданной температуры \bar{T}_H /см. раздел 4/. Требуется найти время электроподогрева t_* , при котором реализуются эти величины и затрачивается минимальная энергия на подогрев.

5.2. Прогрев организуется следующим образом:

а/ в момент $t=0$ электроподогревающее устройство включается на полную мощность.

б/ в момент $t_* \leq t$ электроподогревающее устройство отключается / t - время прогрева нефти до достижения заданных

5.3. Время работы электроподогревающего устройства определяем из решения следующего трансцендентного уравнения:

$$\frac{4\alpha^2 q_c H (T_n - T_0)}{q^*} \exp 2\alpha(\sqrt{\xi} - \sqrt{t_*}) = 2\alpha\sqrt{t_*} - 1 + \exp -2\alpha\sqrt{t_*}$$

$$\alpha = \lambda_n B / 2 q_c H \sqrt{x_n}$$

5.4. Поток тепла q^* при линейной или при спиральной прокладке определяется по формулам раздела 3.

5.5. Решение уравнения п.5.3. существует, если мощность нагревательного устройства такова, что выполняется условие:

$$2\alpha\sqrt{\xi} - 1 + e^{-2\alpha\sqrt{\xi}} \gg \frac{4\alpha^2(T_n - T_0) q_c H}{q^*}$$

5.6. Если мощность электронагревательного устройства мала и условие 5.5. не выполняется, то необходимо изменить исходные параметры ξ , Q , Δp , T_n , так чтобы добиться его выполнения.

5.7. Нахождение времени t_* обеспечивает минимальные затраты электроэнергии на подогрев нефти перед началом перекачки.

Раздел 6.

Определение температуры перекачиваемой нефти и нагревательного устройства

6.1. Температура перекачиваемого продукта определяется по следующей формуле:

$$\bar{T}_n = \frac{q^*}{\alpha} + T_0 \left(T_* - T_0 - \frac{q^*}{\alpha} \right) \exp \left(-\frac{\alpha}{\alpha + \alpha_n} \cdot \frac{6x}{u} \right)$$

/6.1./

где T_* - начальная температура перекачиваемого продукта; T_0 - температура окружающей среды; α - коэффициент теплоотдачи от трубопровода в окружающую среду; x - расстояние по длине трубопровода; u - средняя по сечению скорость потока; α_n - коэффициент теплоотдачи внутрь потока; q^* - мощность электронагревательного устройства.

$$\theta = \frac{4 \cdot \alpha_H}{\rho \cdot c \cdot d_{\text{тр}}}$$

здесь ρ и c - соответственно плотность и теплоемкость перекачиваемого продукта при температуре T_H ; $d_{\text{тр}}$ - диаметр трубопровода.

6.2. Коэффициент теплоотдачи внутрь потока равен

$$\alpha_H = \frac{N_u \cdot \lambda_H}{d_{\text{тр}}}$$

где λ_H - коэффициент теплопроводности перекачиваемого продукта; N_u - число Нуссельта.

6.3. Число Нуссельта в зависимости от режима перекачки определяется по следующим формулам:

$$N_u = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{\theta}} \right)^{0,25}; \quad Re = \frac{Ud}{\nu} \quad /6.3/$$

$$N_u = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{\theta}} \right)^{0,25}; \quad Pr = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c}{\lambda_H} \quad /6.4/$$

где Re , Pr , Gr - соответственно критерии Рейнольдса, Прандтля и Грасгоффа при температуре T_H ; Pr_{θ} - значение критерия при температуре стенки трубы, равной температуре нагревательного устройства θ .

6.4. Формула /6.3/ справедлива при ламинарном режиме течения, т.е. при $Re \leq 2320$, формула /6.4/ - при турбулентном для $Re \geq 10^4$

6.5. Вязкость, входящая в эти критерии определяется по формуле Филонова:

$$\nu = \nu_{\theta} \cdot \exp[-a_x (T_H - \theta)],$$

где ν_{θ} - вязкость перекачиваемого продукта при температуре θ ; a_x - показатель кривизны вязкограммы.

6.6. Удельная мощность для электроподогрева движущейся нефти равна

$$q^* = \alpha_H (\theta - T_H) + \alpha (\theta - T_0)$$

6.7. По формуле п. 6.1. можно определить изменение температуры потока по длине трубопровода, если задана мощность или температура нагревательного устройства.

6.8. Температуру электронагревательного устройства можно определить по следующей формуле:

$$\theta = \frac{q^*}{\alpha} + T_0 + \frac{\alpha_H}{\alpha + \alpha_H} \left(T_* - T_0 - \frac{q^*}{\alpha} \right) \exp\left(-\frac{\alpha \cdot d}{\alpha + \alpha_H} \cdot \frac{x}{U}\right),$$

здесь q^* - мощность электронагревательного устройства, которая определяется в зависимости от его типа / см. раздел 3 настоящей методики/.

Раздел 7.

Гидравлический расчет трубопровода с электрообогревом.

7.1. Коэффициент гидравлического сопротивления в трубопроводе с электрообогревом в зависимости от режима течения определяется по следующим формулам

при ламинарном режиме течения

$$\lambda = \frac{64}{Re} \left\{ \exp\left[-a_* \frac{\alpha}{\alpha + \alpha_H} \left(T_* - T_0 - \frac{q^*}{\alpha} \right) \exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha + \alpha_H} \cdot \frac{v \cdot x}{U}\right)\right] \right\}^{0.5}$$

при турбулентном режиме течения

$$\lambda = \frac{1.639}{\ln^2\left(\frac{Re_0}{7}\right)} \left[1 + \frac{a_* \alpha (T_* - T_0 - \frac{q^*}{\alpha})}{(\alpha + \alpha_H) \ln\left(\frac{Re_0}{7}\right)} \exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha + \alpha_H} \cdot \frac{v \cdot x}{U}\right) \right]^{-2}$$

где Re - значение числа Рейнольдса для вязкости ν_T при температуре T_* , Re_0 - значение числа Рейнольдса для вязкости ν_0 при температуре θ_* .

7.2. Изменение давления в трубопроводе можно вычислить по формулам:

при ламинарном режиме течения

$$\Delta P = \frac{64}{Re} \cdot \frac{\rho U^2}{2d_{вн}} \cdot L \cdot \exp\left(-\frac{A}{2}\right) \left[1 + \frac{d}{d+d_{вн}} \cdot \frac{b \cdot L}{U} \left(1 + \frac{A}{4}\right)\right],$$

где L - длина трубопровода;

$$A = \frac{a \cdot d}{d+d_{вн}} (T_{ж} - T_0 - \frac{q^*}{\alpha});$$

при турбулентном режиме течения

$$\Delta P = \frac{1639}{\ln^2\left(\frac{Re}{4}\right)} \cdot \frac{\rho U^2}{2d} L \left[1 + \frac{2(d+d_{вн})U}{d \cdot b \cdot L} \ln \frac{1 + \frac{A}{\ln(Re/4)} \exp\left(-\frac{b \cdot d \cdot L}{(d+d_{вн})U}\right)}{1 + A/\ln(Re/4)}\right]$$

7.3. Формулы в/п /7.3/ и /7.4/ позволяют определить перепад давления в трубопроводе с электрообогревом с учетом мощности электронагревательного устройства в зависимости от длины рассматриваемого трубопровода.

Раздел 8.

Определение длин обогреваемых и необогреваемых участков трубопроводов.

8.1. Длина начального обогреваемого участка трубопровода, на котором перекачиваемая нефть достигнет заданной температуры нагрева определяется по формуле п. 6.1.

8.2. Длина первого необогреваемого участка трубопровода вычисляется по формуле Шухова, если в конце этого участка задана минимально допустимая температура перекачиваемой нефти с учетом ее температуры застывания:

$$T_{ж} = T_0 + (T_{н} - T_0) \exp\left(-\frac{4d_{вн}}{\rho \cdot c \cdot U} \cdot \frac{x}{d_{вн}}\right) \quad /8.2/$$

где $T_{ж}$ - задаваемая температура

8.3. Дальнейшие расчеты обогреваемых и необогреваемых участков по всей длине трубопровода выполняются соответственно по формулам

ПРИЛОЖЕНИЕ
ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ
ТРУБОПРОВОДОВ С ЭЛЕКТРООБОГРЕВОМ

1. НАЗНАЧЕНИЕ.

Программа "Тепловой и гидравлический расчет трубопроводов с электрообогревом" позволяет получить распределение температур перекачиваемой нефти или нефтепродукта и электронагревательного устройства по длине обогреваемого трубопровода и определить суммарные гидравлические потери в трубопроводе.

Для режима работы трубопровода с периодическим включением и выключением электрообогрева программа вычисляет длины обогреваемых и необогреваемых участков трубы, текущие значения температур перекачиваемой среды и стенки трубопровода, потери напора на трение на этих участках.

Для режима комплексации тепловых потерь, т.е. поддержание постоянной по длине температуры потока с помощью этой программы можно читать необходимую минимальную мощность электрообогрева.

2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ.

Текст программы написан на языке FORTRAN - IV (см. приложение I.I.)

Основные исходные данные: расход и теплофизические свойства перекачиваемого продукта, начальные температуры перекачиваемой среды электронагревательных устройств, их мощность и количество, диаметр трубопровода, толщина стенки трубы и тепловой изоляции, коэффициент теплопроводности изоляции, температура окружающей среды, коэффициент теплоотдачи от поверхности трубопровода в окружающую среду.

Результаты расчета: текущие значения температур перекачиваемого продукта и стенки трубы (или электронагревательного устройства), обогреваемых и необогреваемых участков трубопровода, потери из них, суммарные гидравлические потери, необходимая мощность электрообогрева.

Условные обозначения в тексте программы:

- TZ - начальная температура перекачиваемого продукта;
- TN - текущая температура потока;
- TETAZ - заданная температура электрообогрева;
- TETA - текущая температура обогреваемой станки (или электронагревательного устройства);
- TIZ - температура в конце необогреваемого участка;
- TRM - начальная температура необогреваемой станки;
- TR - текущая температура необогреваемой станки;
- RNU - вязкость перекачиваемого продукта;
- RO - плотность перекачиваемого продукта;
- CP - теплоемкость перекачиваемого продукта;
- DLAMN - коэффициент теплопроводности продукта;
- BETAN - коэффициент объемного расширения перекачиваемого продукта;
- ALFA - коэффициент теплопередачи от трубы в окружающую среду;
- ALFAN - внутренний коэффициент теплоотдачи;
- ALFA1 - коэффициент теплопередачи от стенки трубы в окружающую среду (с учетом теплоизоляции);
- RNUS - значение параметра Нуссельта;
- DELTAР - гидравлические потери в трубопроводе;
- SUM - гидравлические потери в конце трубопровода;
- X - шаг расчета по длине трубопровода;
- Y - текущая длина рассчитываемого участка;
- ZO - текущая длина трубопровода;
- QZ - необходимая мощность электрообогрева;
- P - мощность одного электронагревательного устройства (паспортные данные);
- N - количество электронагревательных устройств.

3. ОПИСАНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ ПРИМЕРОВ.

$L =$

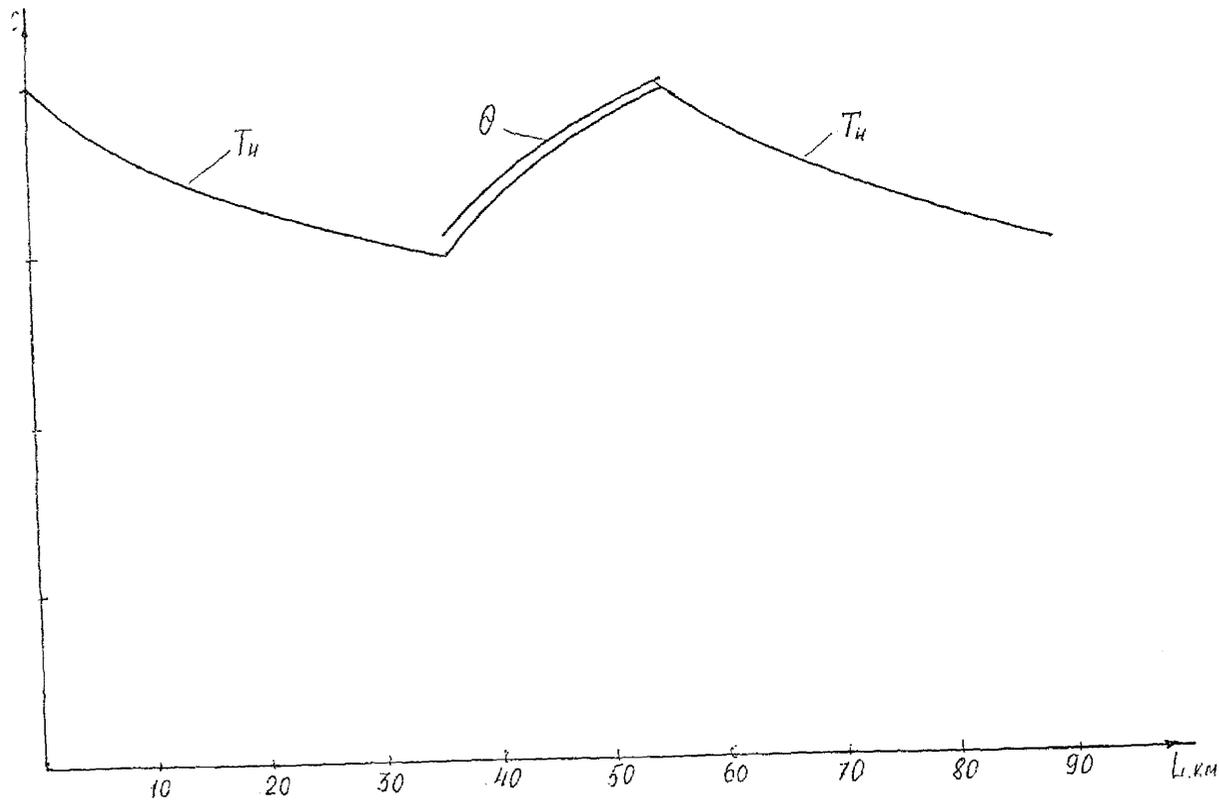
8 км, по которому с расходом $Q = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$, перекачивается мазут "марки 100" со следующими характеристиками: плотность $\rho_{30} = 933 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, вязкость $\nu_{30} = 4200$, начальная температура $T_* = 80^\circ\text{C}$, температура грунта $T_0 = -2^\circ\text{C}$ на глубине заложения $h = 1,4 \text{ м}$. Мазут остывает до 60°C , затем с помощью электрообогрева температура повышается до 80°C и электронагревательные устройства, мощность которых $P = 150 \text{ Вт/м}$, а электричество соответственно $N = 4,6$ и 8 , отключаются. Толщина тепловой изоляции $\delta_{\text{из}} = 15,25$ и 50 мм , коэффициент ее теплопроводности $\lambda_{\text{из}} = 0,0535 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$. Результаты расчета с $N = 4$ и $\delta_{\text{из}} = 15 \text{ мм}$ приведены в приложении I.2. Распределение температур перекачиваемого продукта и электронагревательного устройства изображено на рис.2. Рост гидравлических потерь $\Delta P = F(T)$ по длине трубопровода приведен на рис. Проанализировав все 9 вариантов расчета, вычислив для каждого энергозатраты на перекачку и электрообогрев, определив затраты на теплоизоляцию можно сделать следующие выводы:

- применение электрообогрева позволяет существенно снизить затраты на теплоизоляцию;
- суммарная длина обогреваемых участков сокращается с 50% до 10% от общей длины трубопровода, что сильно снижает затраты на подогрев.

Зависимость энергозатрат на обогрев от мощности электронагревательных устройств для различных толщин теплоизоляции показана на рис.4.

3.2. При необходимости поддержания постоянной температуры по длине трубопровода произведем тепловой и гидравлический расчет режима работы с компенсацией. Исходные данные потока $T_* = 70^\circ\text{C}$. Результаты расчета приведены в приложении I.3. В данном расчете программа сама определяет необходимую минимальную мощность электрообогрева в зависимости от толщины изоляции (см. рис.5).

Рис. 2. График изменения температуры потока (T_n) и электронагревательного устройства (θ) по длине трубопровода.



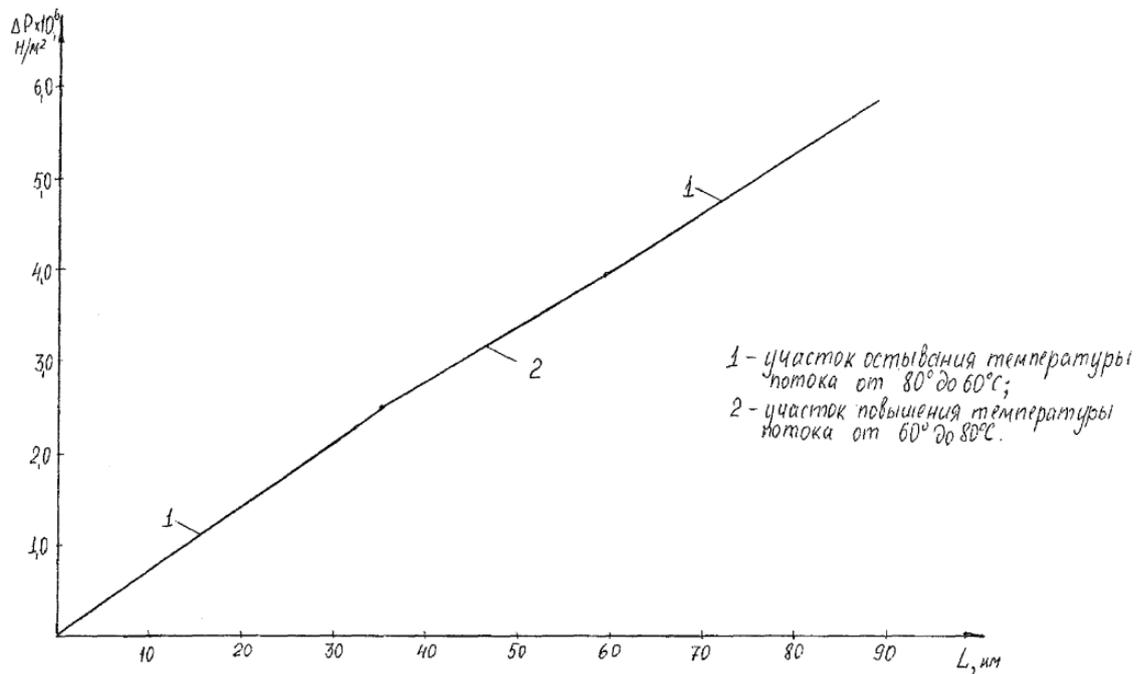


Рис. 3. Зависимость гидравлических потерь от длины трубопровода ($\Delta P = F(\tau_w) \cdot L$)

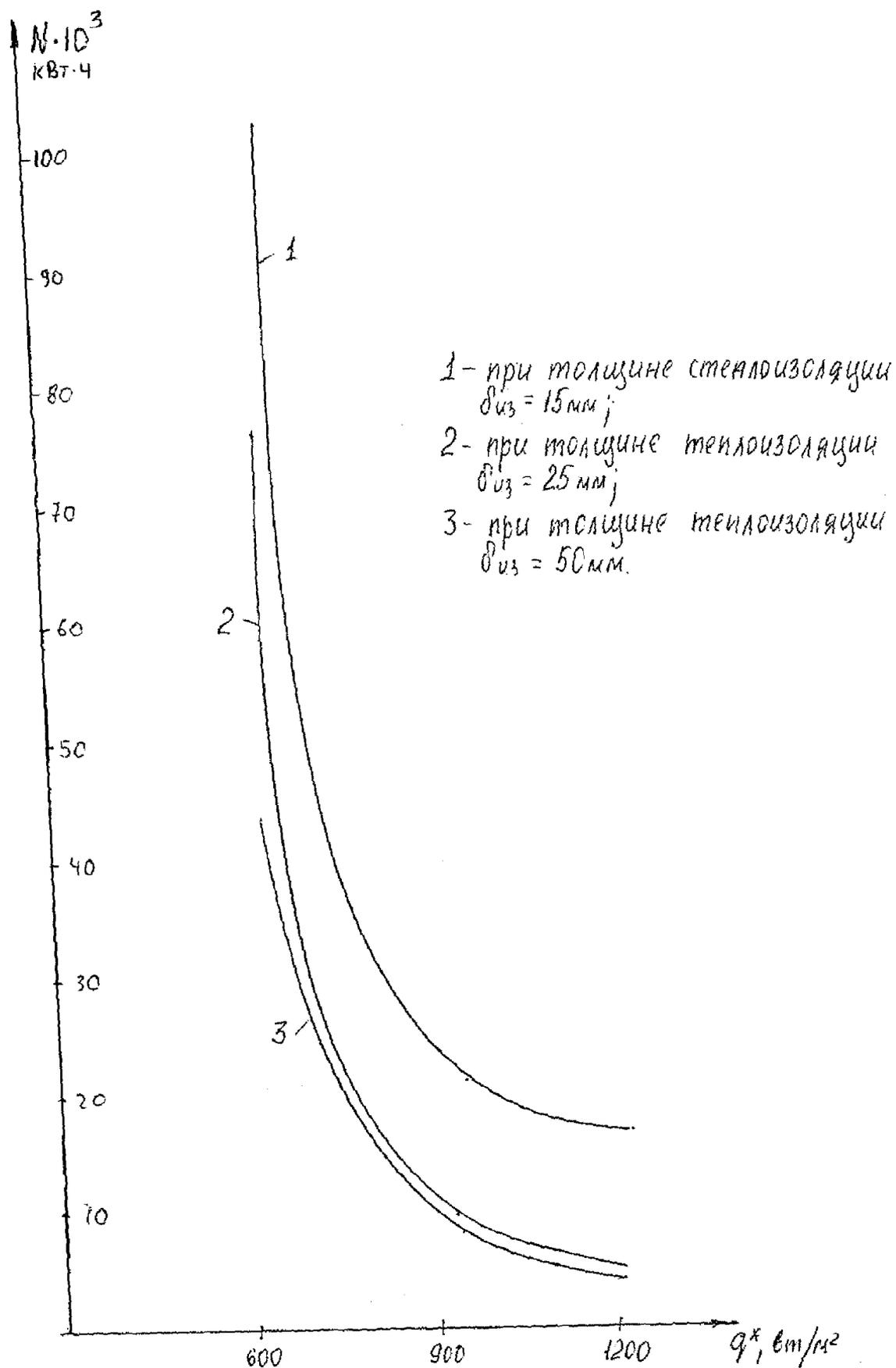


Рис. 4. Зависимость затрат электроэнергии от мощности электрообогрева.

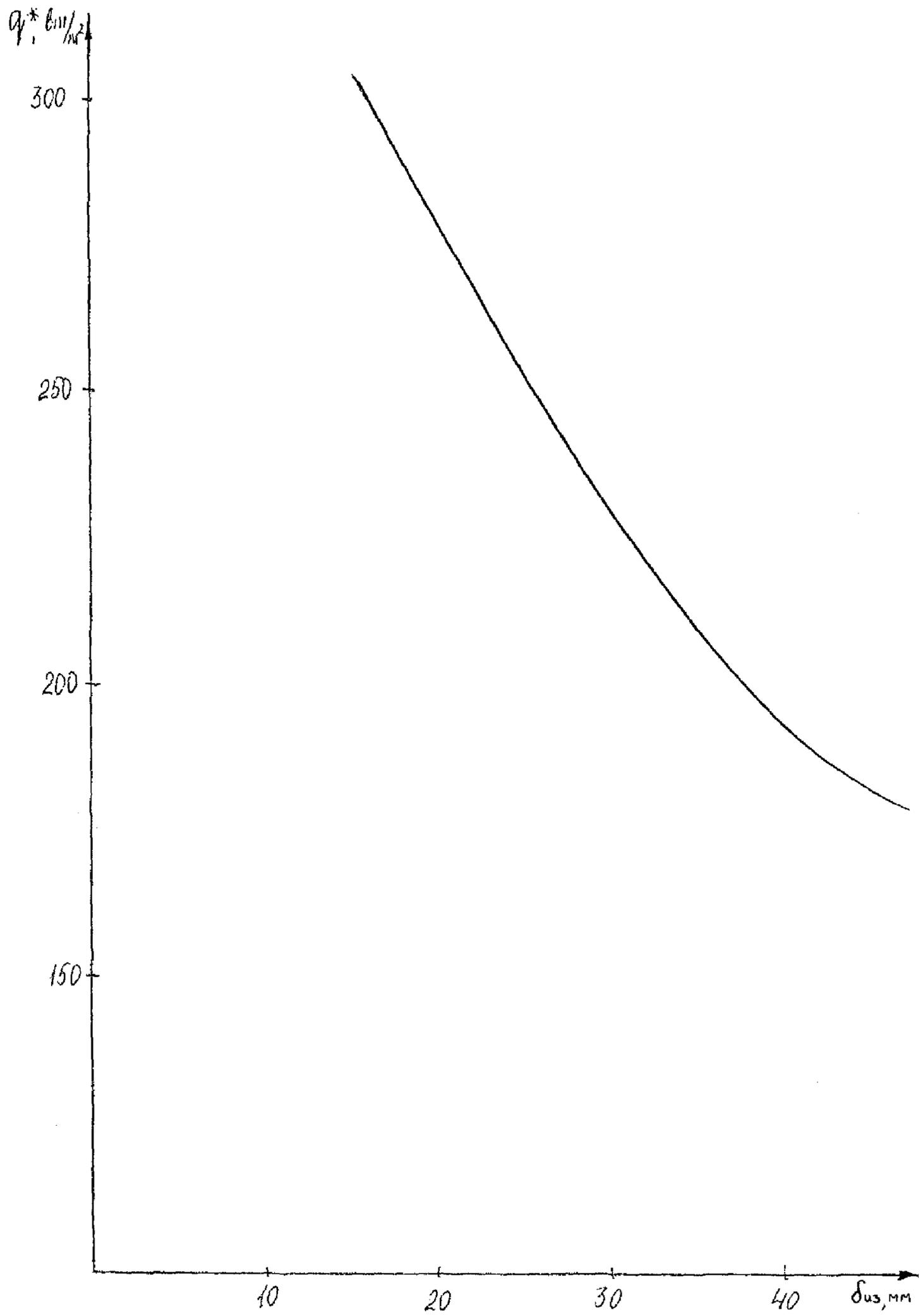


Рис 5 Зависимость мощности от диаметра

ПРИЛОЖЕНИЕ

примеры расчетов по разделам 3 – 5.

Пример расчета /к разделу №3/.

1. Определить мощность устройства электрообогрева теплоизолированного нефтепровода воздушной прокладки диаметров 0,408 м и длиной обогреваемой части 100м. Если заданы: температура нагрева $T_n=40$ С, начальная температура $T_0=30$ С, время нагрева $\tilde{\tau}=30$ минут, число нагревателей $N=2$ /или шаг намотки $\ell=0,15$ м/, для электрообогрева используется гибкий ленточный нагреватель ЭНГЛ-180-1,63/220И27,12.

Заданы также теплофизические параметры перекачиваемой нефти, материала трубы, гибкого ленточного нагревателя.

$$\lambda_n = 0,135 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}; \quad \rho_n = 850 \text{ кг/м}^3; \quad C_n = 1800 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$$

$$\rho_n = 7800 \text{ кг/м}^3; \quad C_n = 460,5 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$$

$$\rho_n = 2500 \text{ кг/м}^3; \quad C_n = 700 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$$

1. По формуле 3.2. определяем поток тепла при линейной прокладке двух диаметрально противоположно расположенных нагревателей:

$$q^* = \frac{PN}{\pi d} = \frac{60 \cdot 2}{3,14 \cdot 0,108} = 354 \text{ Вт/м}^2$$

где P - мощность нагревательного устройства на единицу его длины /паспортные данные/.

2. По формуле 3.3. определяем поток тепла при спиральной прокладке:

$$q^* = \frac{60 \sqrt{0,108^2 \cdot 3,14^2 + 0,15^2}}{3,14 \cdot 0,108 \cdot 0,15} = 437 \text{ Вт/м}^2$$

3. Затем по формуле 3.4. найдем температуру нагревательного устройства и материала трубы:

$$\theta = T_0 + \frac{2q^* N \sqrt{\tau}}{\lambda_n} \left(1 - \frac{1 - \exp[-(\rho C)_0 \sqrt{\tau}]}{(\rho C)_0 \sqrt{\tau}} \right)$$

где

$$(\rho C)_0 = \frac{(\rho C)_n}{\rho C} = 0,45 \quad \tau = \frac{\lambda_n \tilde{\tau} N^2}{(\rho C)_n} = \frac{0,135 \cdot 1800}{1615000 (7 \cdot 10^{-3})^2} = 3,1$$

а) при спиральной прокладке нагревателя θ равно: $\theta = 55,54^\circ\text{C}$

б/ при спиральной прокладке нагревателя θ равно

$$\theta = 61,52^\circ \text{C}$$

Здесь необходимо учесть допустимую температуру нагрева применяемой теплоизоляции и если она превышает допустимый предел термостойкости, то изменить шаг намотки с целью достижения приемлемого для теплоизоляции температурного режима.

4. Среднее по толщине значение температуры нефти равно 3.5.:

$$\bar{T}_n = T_0 + \frac{q^* H \sqrt{\tau}}{\lambda_n} \left[1 - \frac{1}{(gc)_0 \sqrt{\tau}} (1 - \exp(-(gc)_0 \sqrt{\tau})) \right]$$

а/ при линейной прокладке $\bar{T}_n = 42,76^\circ \text{C}$

б/ при спиральной прокладке $\bar{T}_n = 45,76^\circ \text{C}$

5. С помощью формул 3.7а и 3.7.б можно рассчитать мощность необходимую для подогрева нефти перед началом перекачки, если заданы: начальная температура нефти $T_0 = 30^\circ \text{C}$, среднее по толщине значение температуры нефти а/ $\bar{T}_n = 42,76^\circ \text{C}$, б/ $\bar{T}_n = 45,76^\circ \text{C}$, а также теплофизические параметры нефти и металлической трубы, гибкой нагревательной ленты

$$q^* = \frac{\lambda_n (\bar{T}_n - T_0)}{H \sqrt{\tau} F(\tau)} ; \quad F(\tau) = 1 - \frac{1 - \exp[-(gc)_0 \sqrt{\tau}]}{(gc)_0 \sqrt{\tau}}$$

а/ при линейной прокладке нагревателей:

$$q^* = \frac{0,135(42,76 - 30)}{7 \cdot 10^{-3} \cdot 3,07 \cdot 0,237} = 353,7 \text{ Вт/м}^2$$

б/ при спиральной намотке нагревателя:

$$q^* = 437 \text{ Вт/м}^2$$

Здесь в п.5. решается как бы обратная задача, то есть определяется мощность нагревательного устройства /по формулам 3.2. и 3.3./ и затем по паспортным данным подбирается нагревательное устройство.

а/ при линейной прокладке:

$$P = \frac{353,7 \cdot 3,14 \cdot 0,108}{9} = 60 \text{ Вт/м}^2$$

б/ при спиральной намотке:

$$P = 60 \text{ Вт/м}^2$$

Гибкий ленточный нагреватель ЭНГЛ-180-1,63/220И27,12 можно использовать для электрообогрева теплоизолированного нефтепровода воздушной прокладки с параметрами перекачки приведенного выше примера расчета к разделу №3.

Пример расчета /к разделу №4/.

Найти время прогрева пристеночного кольцевого слоя, если заданы: расход $Q = 2 \cdot 10^{-2}$ м/с, перепад давления $\Delta P = 0,1$ ат, длина обогреваемого трубопровода $L = 100$ м, начальная температура нефти $T_0 = 30$ С, температура нагрева $T_n = 40$ С, диаметр трубопровода $d = 0,108$ м.

1. Вязкость нефти при $T_n = 40$ С определяем по формуле 4.4.

$$\mu = \mu_0 \exp[-a(\bar{T}_n - T_0)] = 1,43 \cdot 10^{-2} \text{ н.сек/м}^2$$

где $a(1/^\circ\text{C})$ - показатель крутизны вязкограммы.

$$\mu_0(30^\circ\text{C}) = 1,824 \cdot 10^{-2} \text{ н.сек/м}^2$$

2. Из формулы 4.3. определяем время прогрева пристеночного кольцевого слоя.

$$\tau = \left(\frac{Q \mu L}{\pi d^3 \Delta P \sqrt{2\alpha_n}} \right)^2 = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 1,43^{-2} \cdot 10^2}{3,14 \cdot 0,108^3 \cdot 10^4 \sqrt{8,353 \cdot 10^{-8}}} = 338,7 \text{ с} = 6,65 \text{ мин}$$

3. Температуру нагревательного устройства определим из формулы 4.12. $\theta_n = 2\bar{T}_n - T_0 = 50^\circ\text{C}$

4. Если реология нефти такова, что существенную роль играет начальное напряжение сдвига τ_0 , то перепад давления при котором начнется движение нефти /формула 4.5./ равен: ($\tau_0 = 0,12$ нт/м²)

$$\Delta P = \frac{4d}{\alpha} \tau_0 = \frac{4 \cdot 100 \cdot 0,12}{0,108} = 462,96 \text{ нт/м}^2 = 0,46 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$$

давления $\Delta P = 0,46 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$ определяется по формуле 4.9.

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \mu L} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2 \Delta T_0}{R \Delta P} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2 \Delta T_0}{R \Delta P} \right)^4 \right] \approx$$

$$\approx \frac{3,14 \cdot 0,05^4 \cdot 4,6 \cdot 10^3}{8 \cdot 1,43 \cdot 10^{-2} \cdot 10^2} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2 \cdot 10^2 \cdot 0,12 \cdot 10}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,46 \cdot 10^4} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2 \cdot 10^2 \cdot 0,12 \cdot 10}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,46 \cdot 10^4} \right)^4 \right] \approx$$

$$\approx 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Пример расчета /к разделу №5/

необходимое для нагрева

Заданы: Время работы электронагревательного устройства $\tau = 1800 \text{ с}$
 начальная температура нефти $T_0 = 30 \text{ С}$, температура нагрева $T_n = 40 \text{ С}$,
 q^* - мощность электронагревательного устройства

А/ 354 Вт/м^2

Б/ 437 Вт/м^2 ,

а также теплофизические параметры

нефти, нагревательной ленты, материалов трубопровода и изоляционного покрытия

$\lambda_n = 0,135 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$; $\lambda_l = 0,0535 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$; $\rho_n = 850 \text{ кг/м}^3$

$\rho_i = 200 \text{ кг/м}^3$; $\rho_n = 7800 \text{ кг/м}^3$; $\rho_n = 2500 \text{ кг/м}^3$; $c_n = 1900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

$c_i = 740 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; $c_n = 460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; $c_n = 700 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

1. Сначала определим существуют ли решения трансцендентного уравнения /формула 5.3./, то есть определим возможно ли при заданных исходных параметрах осуществить прогрев нефти менее чем за 30 минут.

Для этого проверим выполняется ли неравенство /формула 5.5/:

$2a \sqrt{x} - 1 + e^{-2a \sqrt{x}} \geq \frac{4a^2 \rho c H (T_n - T_0)}{q^*}$; $a = \frac{\lambda_n \rho}{2 \rho c H \sqrt{x_n}}$

$\beta_0 = 1 + \sqrt{\frac{\lambda_i(\rho c)_i}{\lambda_n(\rho c)_n}}$; $\rho c = (\rho c)_n \frac{\delta}{H} + (\rho c)_l \frac{h}{H}$

$a = 0,013 \text{ с}^{-1/2}$; $\beta_0 = 1$; $(\rho c) = 2,54 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$; $x_n = 8,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
 а/ $q^* = 354 \text{ Вт/м}^2$

$$2 \cdot 0,013 \cdot \sqrt{1800} - 1 + e^{-2 \cdot 0,013 \sqrt{1800}} \gg \frac{4 \cdot 0,013^2 \cdot 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{354}$$

$$0,44 > 0,35$$

$$б) q^* = 437 \text{ Вт/м}, \quad 0,44 > 0,28$$

Условие /формула 5.5./ выполняется для а/ $q^* = 354 \text{ Вт/м}$ и

$$б) q^* = 437 \text{ Вт/м}.$$

Теперь определим оптимальное, с точки зрения энергозатрат, время работы электроподогревающего устройства

$$2a\sqrt{t_*} - 1 + e^{-2a\sqrt{t_*}} = \frac{4a^2 q c H (\bar{T}_H - T_0)}{q^*} \exp 2a(\sqrt{\bar{t}} - \sqrt{t_*})$$

$$\text{Обозначим комплекс} \quad \frac{4a^2 q c H (\bar{T}_H - T_0)}{q^*} \Rightarrow N$$

$$а) N \quad \text{при} \quad q^* = 354 \text{ Вт/м}, \quad N = 0,35$$

$$б) N \quad \text{при} \quad q^* = 437 \text{ Вт/м}, \quad N = 0,28$$

т.к. $\bar{t} = 1800 \text{ сек}$, то $e^{2a\sqrt{\bar{t}}} = 3,05$ обозначим $2a\sqrt{t_*}$ через

Тогда уравнение 5.3. примет вид

$$а) z - 1 + e^{-z} = 1,06 \cdot e^{-z}$$

$$б) z - 1 + e^{-z} = 0,9 \cdot e^{-z}$$

Обозначим левую часть уравнения 5.3. через $f_1(z) = z - 1 - e^{-z}$
 правую часть уравнения 5.3. через $f_2(z) = N e^{2a\sqrt{t}} e^{-z}$

Решением трансцендентного уравнения 5.3. будет точка пересечения функций $f_1(z)$ и $f_2(z)$

Корни равны: случай а/ $z_a = 1,02$; случай б/ $z_b = 0,95$.

Отсюда $t_* = \left(\frac{z}{2a}\right)^2 = 1507 \text{ с} = 25,12 \text{ мин}$ в случае а/ и $t_* = 21,79 \text{ мин}$ в случае б/.

Таким образом заданных исходных параметров ^{прогрева} можно достичь менее, чем за 30 минут, в случае а/ $t_x = 25,12$ мин, в случае б/ $t_x = 21,79$ минут.