МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО СБОРУ, ПОДГОТОВКЕ И ТРАНСПОРТУ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ (ВНИИСПТнефть)

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 нефтей 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. ОНИЛ транспорта нефти,

профессор Марон В.И.,

мл.науч.сотр. Гарина-Янычева Н.А.

мл.науч.сотр. Рыкин С.Ю.

ВНИИСПТ нефть г. Уфа

ВНИПИнефть

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 нефтей и нефтепродуктов (временный)

РД _____

Уфа 1987г.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Методика расчета параметров и оптимальных режимов эксплуатации трубопроводов с электрообогревом для перекачки высоковязких 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 устройства 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, $м^3/с$;

d - диаметр трубопровода /наружный/, $м$;

L - длина трубопровода, $м$;

ΔP - перепад давления на обогреваемом участке, $Н/м^2$;

μ - динамическая вязкость нефти, $Н/м \cdot с$;

ν - кинематическая вязкость нефти, $м^2/с$;

$\lambda_н$ - коэффициент теплопроводности нефти, $Вт/м \cdot град$;

ρ - плотность нефти, $кг/м^3$;

ρ_i - плотность изоляции, $кг/м^3$;

c - удельная массовая теплоемкость, $Дж/кг \cdot град$;

τ_0 - начальное напряжение сдвига, $кгс/см^2$;

T_* - начальная температура нефти перед разогревом, $K, °C$;

$T_н$ - температура нагрева нефти, $K, °C$;

θ - температура электронагревательного устройства, $K, °C$;

t_* - время оптимального электроподогрева, $с$;

$\tilde{t}$ - время прогрева нефти до температуры Тн, $с$;

λ_i - коэффициент теплопроводности изоляции, $Вт/м \cdot град$;

$(\rho c)_i$ - теплоемкость единицы объема изоляции, $Дж/м^3 \cdot град$;

$(\rho c)_л$ - теплоемкость единицы объема ленты, $Дж/м^3 \cdot град$;

$(\rho c)_м$ - теплоемкость единицы объема металла трубопровода, $Дж/м^3 \cdot град$;

δ - толщина стенки трубопровода, $м$;

h - толщина нагревательной ленты, $м$;

H - сумма толщин нагревательной ленты и стенки трубы, $м$;

q^* - поток тепла, $Вт/м^2$;

P - мощность нагревательного устройства на единицу его длины, $Вт/м$;

N - число нагревателей,

ℓ - шаг намотки спиральной укладки ленты, $м$;

T_i - температура изоляции, K;

$\alpha_н$ - коэффициент теплоотдачи в ядро потока, $Вт/м^2 \cdot град$;

U - скорость перекачки нефти, $м/с$;

T_0 - температура окружающей среды, $°C$;

α - коэффициент теплоотдачи от трубопровода в окружающую среду, $Вт/м^2 \cdot град$;

$a_к$ - показатель кривизны вязкограммы.

I. Общие положения

I.I. 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.

I.2. Использование электрообогревательных устройств дает возможность автоматизировать процесс регулирования температурного режима перекачки нефти.

I.3. Электрооообогревательные 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.

I.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 достаточным чтобы возобновить перекачки и продолжать ее.

I.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.I. 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.I.2. Различные методы электрообогрева можно классифицировать в соответствии со схемой изображенной на рис.I.

2.I.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 электрооообогрева не нашел широкого применения.

2.I.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-I200 м.

2.I.5. Для косвенного обогрева используются нагревательные кабели. Наибольшее распространение получили кабели с минеральной

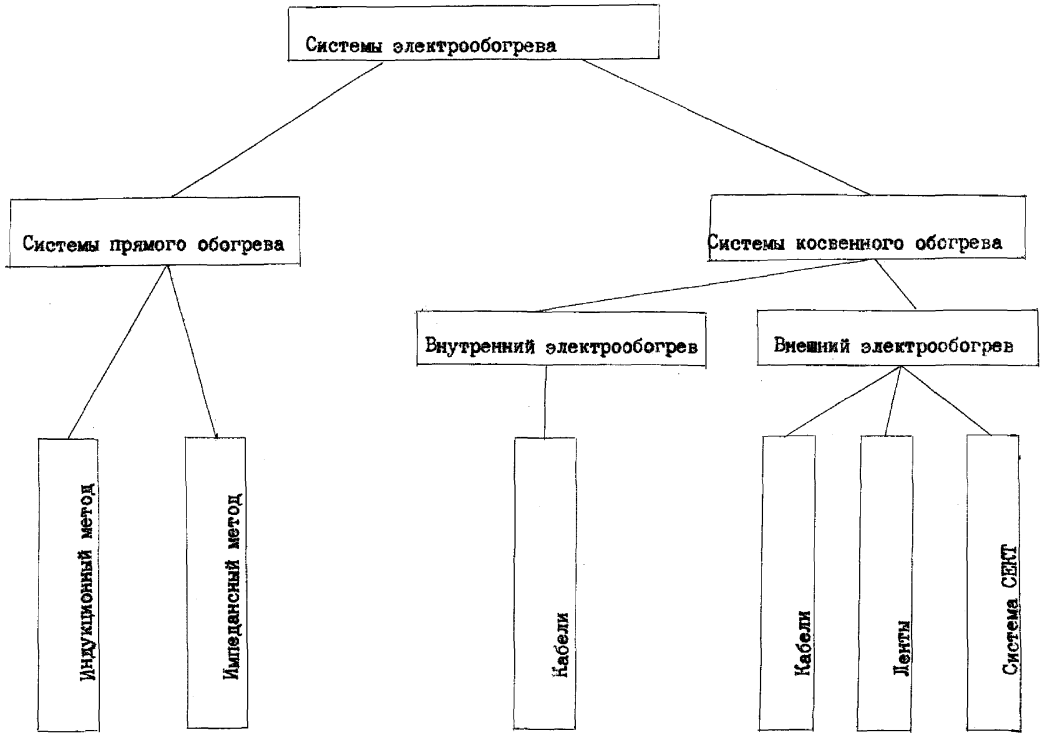

Системы электрообогрева
Системы прямого обогрева
Системы косвенного обогрева
Внутренний электрообогрев
Внешний электрообогрев
Индукционный метод
Импедансный метод
Кабели
Кабели
Ленты
Система СЕКТ

Рис.1.

изоляцией и металлической оболочкой - кабели МИ. Выпускаются кабели в медной и стальной оболочках /КМЖ/, /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 РСФСР - 5 - 28.

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

2.I.6. Наиболее универсальная система косвенного электрообогрева - гибкие ленточные нагреватели.

2.I.7. Существуют два типа ленточных нагревателей:

тип ЭНГЛ-I80 /элемент нагревательный, гибкий, ленточный/

тип НТЛ /нагреватель теплостойкий ленточный/.

2.I.8. Технические данные нагревателей ЭНГЛ приведены в таблице I.

Таблица I.

Технические данные нагревателей.

Технические данные	тип нагревателей		
	ЭНГЛ-I80	ЭНГЛВ-I80	ЭНГЛ-I80ХЛ2
Номинальное напряжение, В	220	220 и 380	36 и 220
Удельная мощность, Вт/м	40-I00	30-I00	40-I00
Номинальная мощность, кВт	0,I7-2I0	0,I43-2,I0	0,II-2,I0
Электричес, сопротивление изоляции /не менее/, М Ом:			
- в холодном состоянии	I,0	I,0	I,0
- в рабочем состоянии	0,5	0,5	0,5
Длина, м	2,55-33,I2	2,48-38,I7	I,7-33,I2
Ширина, мм	30-33	30-4I	30-4I

2.I.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	I50-360
Номинальная мощность, кВт	I,02-5,45
Электрич. сопротивление изоляции /не менее/ М Ом	
- в холодном состоянии	I,0
- в рабочем состоянии	0,5
Длина, м	4,3-23,4
Ширина, мм	22
Толщина, мм	2,5
Масс, кг	0,84-2,I

2.I0. Существуют две конструкции гибких нагревателей ЭНГЛ-I80, ЭНГЛВ-I80, ЭНГЛ-I80 ХЛ2:

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

2.II. Пример записи условного обозначения нагревателя марки ЭНГЛ-I80 мощностью I,63 кВт, с номинальным напряжение 220 В, исполнения П и длиной активной части 27,I2 м - ЭНГЛ-I80-I, 63/220 27,I2.

2.I27 Пример записи условного обозначения нагревателя марки НГЛ-400 с номинальным напряжением 220 В, удельной мощностью I50 Вт/м длиной активной части I3,52 м - НТЛ-400-220-I50-I3,52.

2.I3. Нагреватели ЭНГЛ в исполнении П допускают последовательное соединение в цепи до I30 м и мощностью до 5,5 кВт.

2.14. Нагреватели ЭНГЛ имеют герметезирующую 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 Крайонего Севера.

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

2.17. Гибкие нагреватели прокладываются вдаль 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 вдаль 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. Отсутсвие 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 и 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 400-450Вт/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/м³	Коэффициент теплопроводности Вт/мград
	длина	ширина внутр. диаметра	толщина		
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
			50		
			60		
Полуцилиндры теплоизоляционные из минеральной ваты на сентетическом связующем/ГОСТ23208-78/	500	57	40	100	0,0465
		76	50	150	0,051
		89	60		
	1000	108	40	200	0,0535
			50		
			60		
Цилиндры полые теплоизоляционные из минеральной	500	57	30;40	150	0,051
		76	50		

750	I08	40	200	0,053
	I33	50		
	I59	60		
I000	2I9	50	250	0,056
	273	60		

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

2.29. Кроме того промышленностьтвыпускает 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-I70
коэффициент теплопроводности Вт/м,град	0,035-0,46
стоимость руб/м^3	I6-24

Стекловолокнистые изделия на синтетическом связующем используются при температурах до I80^{o}C, а прошивные маты при температурах до 450°C.

2.3I. Все более широкое применение находят теплоизоляционные конструкции из пено и поропластов

Технические данные изоляции из пено и поропластов:

Термостойкость ^{o}C	I40-I50
плотность, кг/м^3	40-200
теплопроводность, Вт/м.град	0,042-0,060
стоимость, руб/м^3	I00-I50

Раздел 3.

Расчет параметров для выбора средств электроподогрева при возобновлении перекачки.

3.I. 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

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

где ℓ - шаг намотки.

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

$$\theta = T_0 + \frac{2q^* H \sqrt{\tau}}{\lambda_н} \left(1 - \frac{1 - exp[-(\rho C)_0 \sqrt{\tau}]}{B(\rho C)_0 \sqrt{\tau}}\right), \quad (\rho C)_0 = \frac{(\rho C)_н}{\rho C}$$

$$B = 1 + \sqrt{\lambda_i (\rho C)_i / \lambda_н (\rho C)_н}$$

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; $\lambda_н$ - коэффициент теплопроводности нефти; $(\rho C)_н$ - теплоемкость единицы объема нефти; ρC - суммарная теплоемкость материала трубы и нагревательной ленты или другого устройства

$$\rho c = (\rho c)_м \frac{\delta}{H} + (\rho c)_л \frac{h}{H}, \qquad H = \delta + h$$

где $(\rho c)_м$, $(\rho c)_л$ - теплоемкость материала трубы и нагревательной ленты; δ - толщина стенок трубы; h - толщина нагревательной ленты,

$$\tau = \frac{\lambda_н t}{(\rho c)_н H^2}$$

где t - время от начала нагрева.

3.5. Среднее по толщине зоны прогрева значение температуры нефти равно

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

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 P, число нагревателей N или шаг намотки ℓ, время процесса нагрева t.

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

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

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 Тн, 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.I. 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

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

здесь Q - расход на участке обогрева длиной L; $\varkappa_н$ - коэффициент температуропроводности нефти.

4.4. Зависимость μ от Тн представляется в виде

$$\mu = \mu_0 \exp\left[-a_*(\bar{T}_н - T_0)\right]$$

где μ_0 - вязкость при температуре То; a_* - 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

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

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

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

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

4.8. Затем по известной зависимости τ_0 от $\bar{T}_н$ находим температуру нагрева $\bar{T}_н$.

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

$$Q = \frac{\pi d^4}{128 L \mu(\bar{T}_н)} \cdot \left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{4L \cdot \tau_0}{d \Delta P}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{4L \tau_0}{d \Delta P}\right)^4\right]$$

4.10. Если задать Q, ΔP, $T_н$, 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 $\bar{T}_н$ можно найти температуру нагрева электронагревательного устройства по формуле

$$\theta = 2 \cdot \bar{T}_н - T_*$$

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 $\bar{T}_н$ /см. раздел 4/. Требуется найти время электроподогрева t_*, при котором реализаются 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:

$$\frac{4a^2 \varrho c H (T_н - T_o)}{q^*} \exp 2a(\sqrt{\mathcal{T}} - \sqrt{t_*}) = 2a\sqrt{t_*} - 1 + \exp -2a\sqrt{t_*}$$

$$a = \lambda_н \mathcal{B} / 2 g c H \sqrt{\varkappa_н}$$

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:

$$2a\sqrt{\mathcal{T}} - 1 + e^{-2a\sqrt{\mathcal{T}}} \gg \frac{4a^2(\bar{T}_н - T_o)\varrho c H}{q^*}$$

5.6. Если мощность электронагревательного устройства мала и условие 5.5. не выполняется, то необходимо изменить исходные параметры $\mathcal{T}$, Q, Δp, $\bar{T}_н$, 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.I. Температура перекачиваемого продукта определяется по следующей формуле:

$$\bar{T}_н = \frac{q^*}{\alpha} + T_o\left(T_* - T_o - \frac{q^*}{\alpha}\right)\exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha + \alpha_н} \cdot \frac{bx}{u}\right) \qquad /6.I./$$

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

$$b = \frac{4 \cdot \alpha_н}{\rho \cdot C \cdot d_{вн}}$$

здесь ρ и C - соответсвенно плотность и теплоемкость перекачиваемого продукта при температуре Тн; $d_{вн}$ - диаметр трубопровода.

6.2. Коэффициент теплоотдачи внутрь потока равен

$$\alpha_н = \frac{N_u \cdot \lambda_н}{d_{вн}}$$

где $\lambda_н$ - коэффициент теплопроводности перекачиваемого продукта; N_u - число Нуссельта.

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

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

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

где Re, Pr, Gr - соответственно критерии Рейнольдса, Прандтля и Грасгоффа при температуре Тн; 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:

$$\nu = \nu_\theta \cdot exp\left[-a_* (T_н - \theta)\right],$$

где ν_θ - вязкость перекачиваемого продукта при температуре θ; a_* - показатель кривизны вязкограммы.

6.6. Удельная мощность для электроподогрева движущейся нефти равна

$$q^* = \alpha_н (\theta - T_н) + \alpha (\theta - T_0)$$

6.7. По формуле п. 6.I. 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:

$$\theta = \frac{q^*}{\alpha} + T_0 + \frac{\alpha_н}{\alpha+\alpha_н}\left(T_* - T_0 - \frac{q^*}{\alpha}\right) exp\left(-\frac{b\cdot\alpha}{\alpha+\alpha_н}\cdot\frac{x}{u}\right),$$

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

при ламинарном режиме течения

$$\lambda = \frac{64}{Re}\left\{exp\left[-a_*\frac{\alpha}{\alpha+\alpha_н}\left(T_* - T_0 - \frac{q^*}{\alpha}\right) exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha+\alpha_н}\cdot\frac{b\cdot x}{u}\right)\right\}^{0,5}$$

при турбулентном режиме течения

$$\lambda = \frac{1,639}{ln^2\left(\frac{Re_\theta}{7}\right)}\left[1 + \frac{a_*\alpha\left(T_* - T_0 - \frac{q^*}{\alpha}\right)}{(\alpha+\alpha_н)\, ln\left(Re_\theta/7\right)} exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha+\alpha_н}\cdot\frac{b\cdot x}{u}\right)\right]^{-2}$$

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

7.2. Изменение давления в трубопроводе можно вычислить по формулам:

при ламинарном режиме течения

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

где L - длина трубопровода;

$$A = \frac{a_* \alpha}{\alpha + \alpha_н}\left(T_* - T_0 - \frac{q_*}{\alpha}\right);$$

при турбулентном режиме течения

$$\Delta P = \frac{1639}{\ln^2\left(\frac{Re_0}{7}\right)} \cdot \frac{\rho U^2}{2d} L \left[1 + \frac{2(\alpha + \alpha_н) U}{\alpha \cdot b \cdot L} \ln \frac{1 + \frac{A}{\ln(Re_0/7)} exp\left(-\frac{b \cdot \alpha \cdot L}{(\alpha + \alpha_н) U}\right)}{1 + A/\ln(Re_0/7)}\right]$$

7.3. Формулы п/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.I. Длина начального обогреваемого участка трубопровода, на котором перекачиваемая нефть достигнет заданной температуры нагрева определяется по формуле п. 6.I.

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:

$$T_к = T_0 + (T_н - T_0)\, exp\left(-\frac{4 \alpha_н}{\rho \cdot c \cdot U} \cdot \frac{x}{d_{вн}}\right) \qquad /8.2/$$

где $T_к$ - 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

I. НАЗНАЧЕНИЕ.

Программа "Тепловой и гидравлический расчет трубопроводов с лектрообогревом" позволяет получить распределение температур пере-ачиваемой нефти или нефтепродукта и электронагревательного устройс-за по длине обогреваемого трубопровода и определить суммарные гид-влические потери в трубопроводе.

Для режима работы трубопровода с периодическим включением и ключением электрообогрева программа вычисляет длины обогреваемых и обогреваемых участков трубы, текущие значения температур перекачи-мой среды и стенки трубопровода, потери напора на трение на этих стках.

Для режима комплексации тепловых потерь, т.е. поддержание пос-нной 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. при-ие I.I.)

Основные исходные данные: расход и теплофизические свойства пе-иваемого продукта, начальные температуры перекачиваемой среды ктронагревательных устройств, их мощность и количество, диаметр а трубопровода, толщина стенки трубы и тепловой изоляции, ко-ент теплопроводности изоляции, температура окружающей среды, ый коэффициент теплоотдачи от поверхности трубопровода в окру-среду.

зультаты расчета: текущие значения температур перекачиваемого а и стенки трубы (или электронагревательного устройства), богреваемых и необогреваемых участков трубопровода, потери з них, суммарные гидравлические потери, необходимая мощность обогрева.

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;

TRN - 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 - коэффицент теплопередачи от стенки трубы в окружающую среду (с учетом теплоизоляции);

RNUS - значение параметра Нуссельта;

DELTAP - 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.

$L=$
8км, по которому с расходом $Q=400\ м^3/ч$, перекачивается мазут "марки 100" со следующими характеристиками: плотность $\rho_{30}=933\ \frac{кг}{м^3}$, вязкость $\nu_{30}=4200$, начальная температура $T_*=80°C$, температура грунта на $T_0=-2°C$ на глубине заложения $h=1{,}4м$. Мазут остывает до 60°С, затем с помощью электрообогрева температура повышается до 80°С и электронагревательные устройства, мощность которых $P=150\ вт/м$, а электричество соответственно $N=4{,}6$ и 8, отключаются. Толщина тепловой изоляции и $\delta_{из}=15{,}25$ и 50 мм, коэффициент ее теплопроводности $\lambda_{из}=0{,}0535\ \frac{вт}{м\,гр}$. Результаты расчета с $N=4$ и $\delta_{из}=15$ 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 электрообогрева, определив затраты на теплоизоляцию можно сделать следующие выводы:

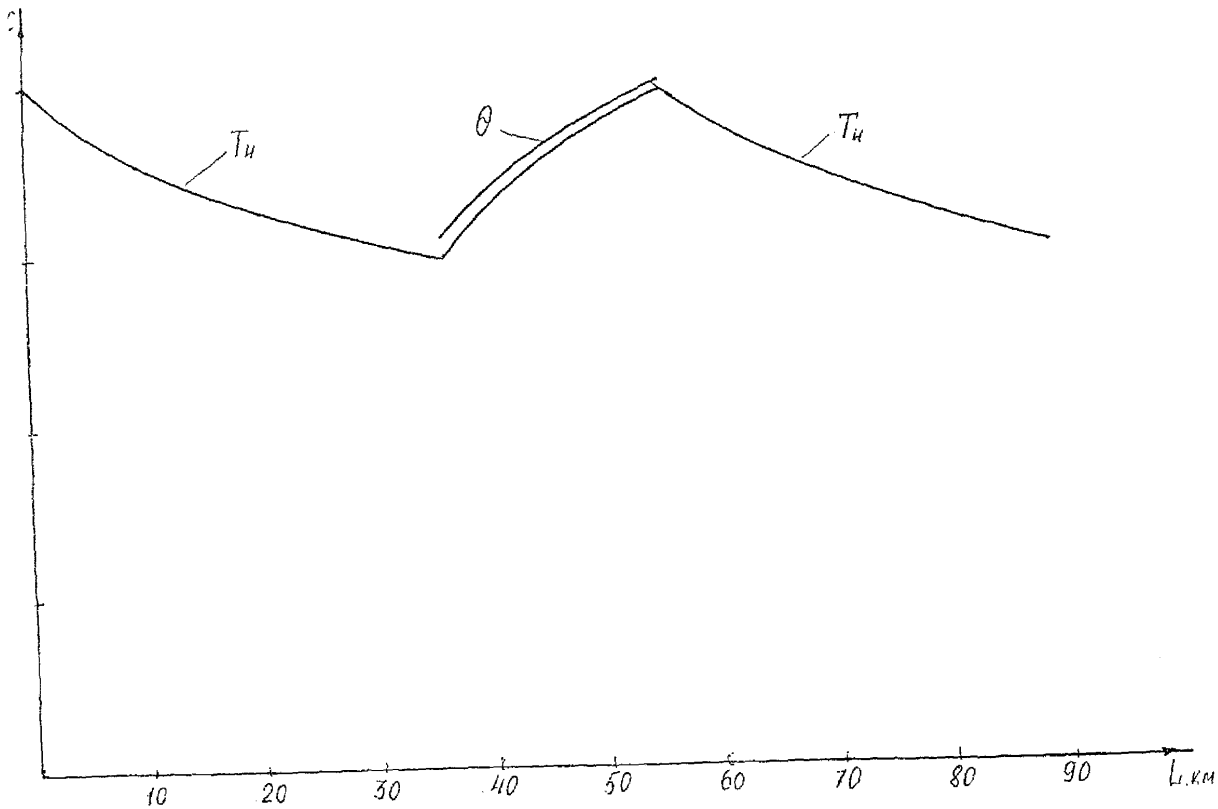
– применение электрообогрева позволяет существенно снизить затраты на теплоизоляцию;

– суммарная длина обогреваемых участков сокращается с 50% до 1/3 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 всей трубопровода произведем тепловой и гидравлический расчет режима с компенсации. Исходные данные потока $T_*=70°C$. 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 ($T_н$) и электронагревательного устройства (θ) по длине трубопровода.



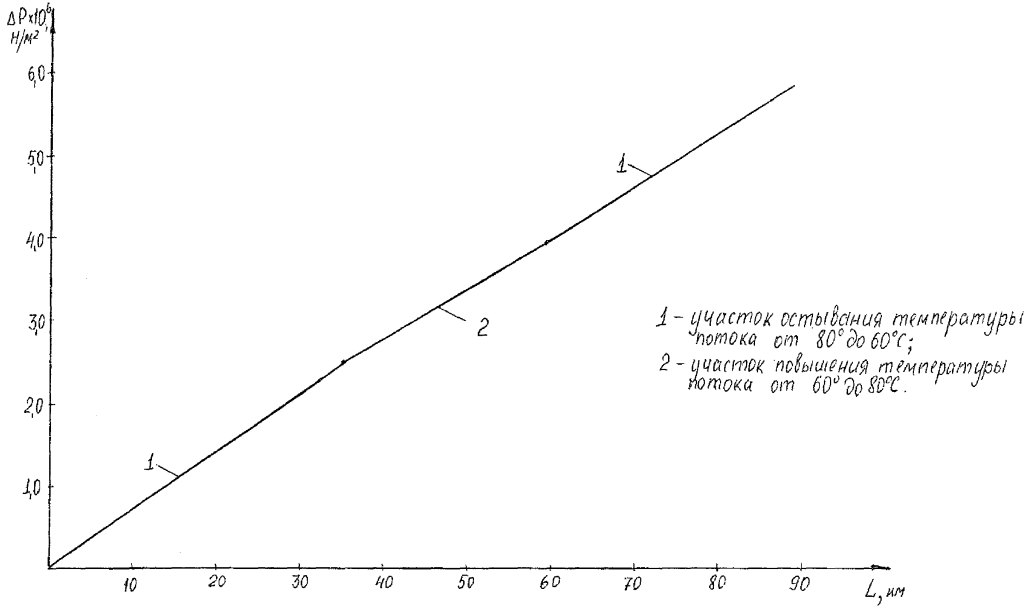


Рис. 3. Зависимость гидравлических потерь от длины трубопровода ($\Delta P = F(T_n) \cdot L$)

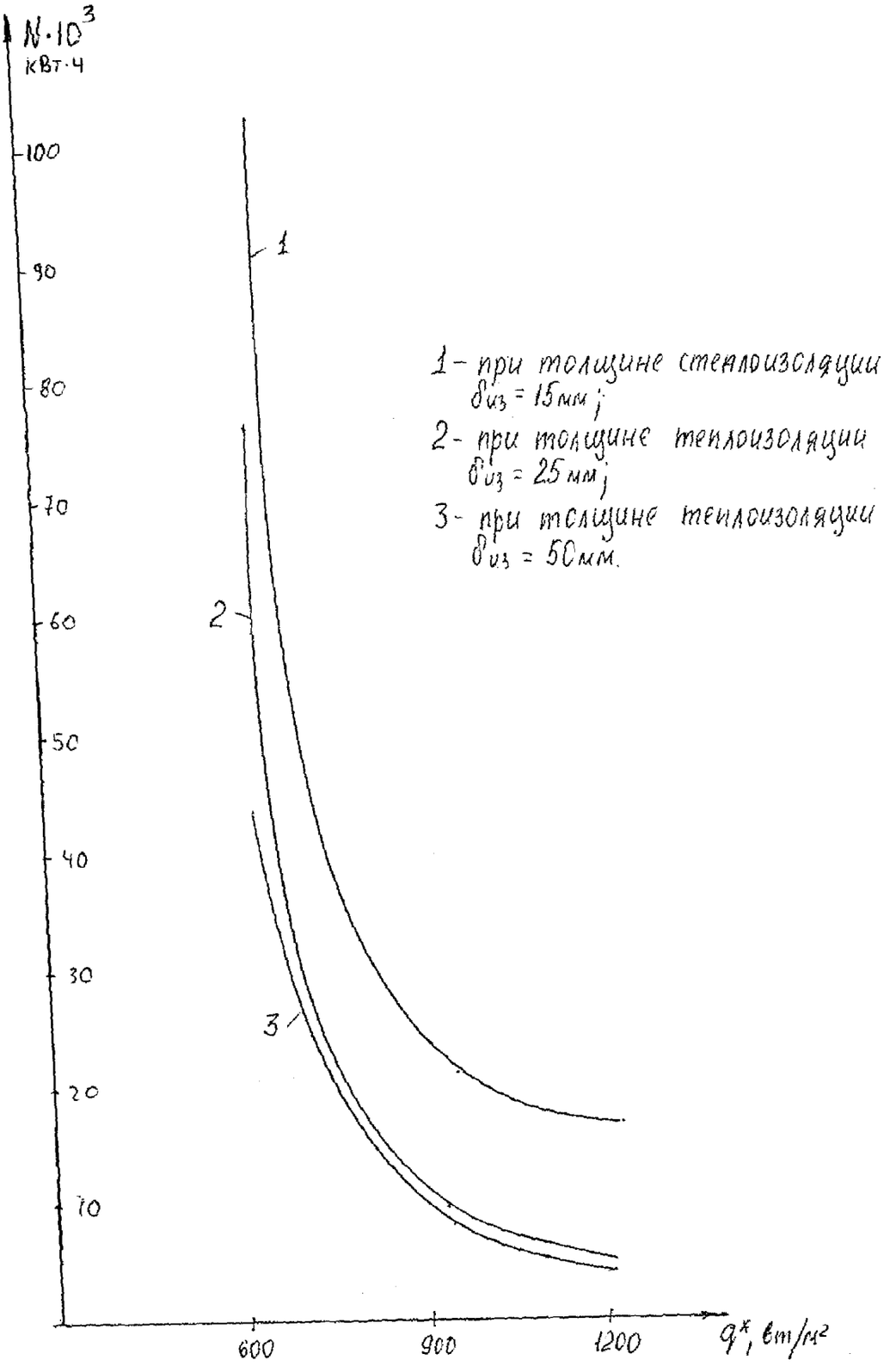


Рис. 4. Зависимость затрат электроэнергии от мощности электрообогрева.

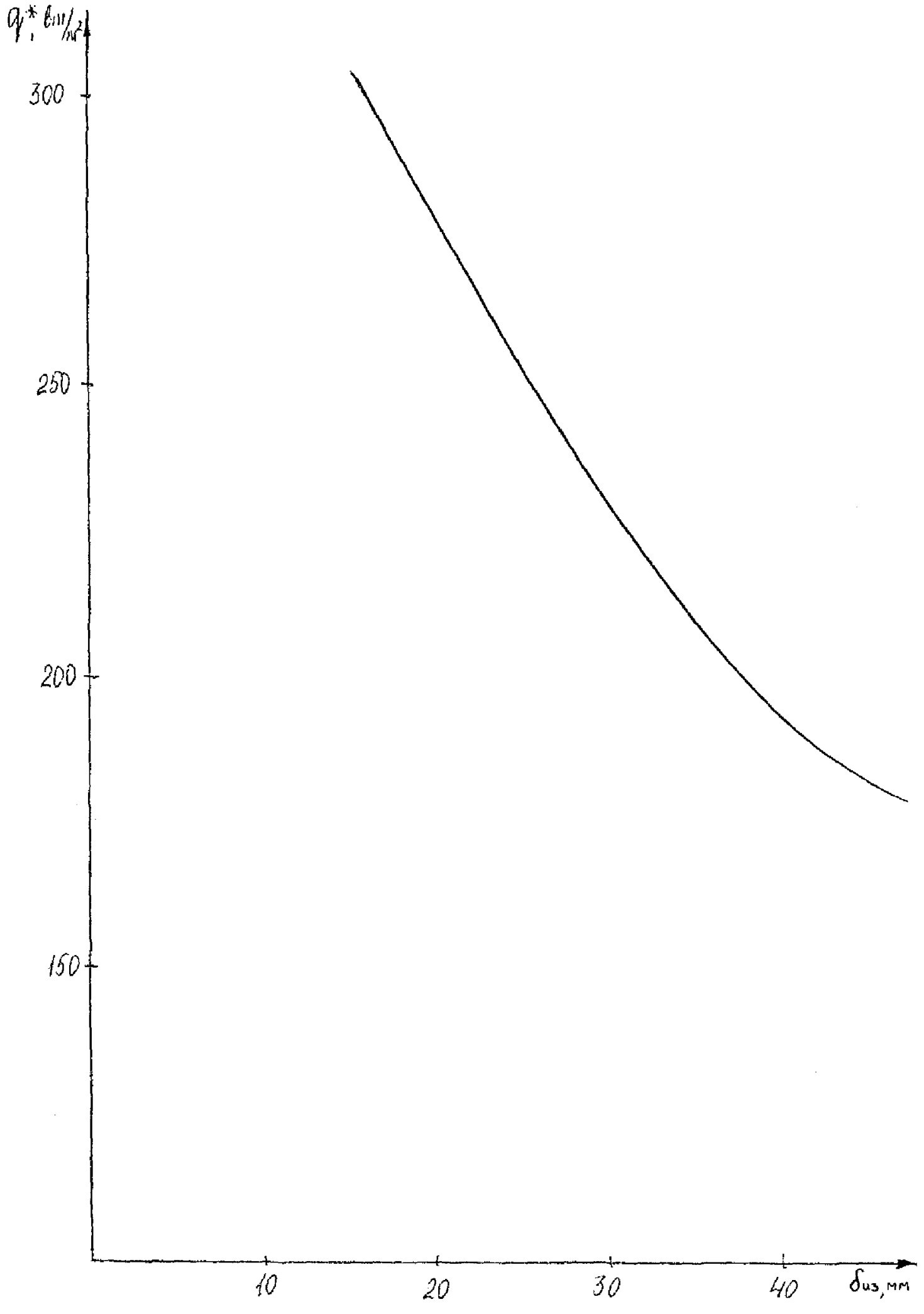


Рис 5 Зависимость мощности

ПРИЛОЖЕНИЕ

примеры расчетов по разделам 3 - 5.

Пример расчета /к разделу №3/.

I. Определить мощность устройства электрообогрева теплоизолированного нефтепровода воздушной прокладки диаметров 0,108 м и длиной обогреваемой части 100м. Если заданы: температура нагрева Тн=40 С, начальная температура То=30 С, время нагрева $\tilde{\tau}$=30 минут, число нагревателей N=2 /или шаг намотки ℓ=0,15м/, для электрообогрева используется гибкий ленточный нагреватель ЭНГЛ-180-I,63/220И27,I2.

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

$\lambda_н = 0{,}135$ Вт/м·град ; $\rho_н = 850$ кг/м³ ; $C_н = 1800$ Дж/кг·град

$\rho_н = 7800$ кг/м³ ; $C_н = 460{,}5$ Дж/кг·град

$\rho_л = 2500$ кг/м³ ; $C_л = 700$ Дж/кг·град

I. 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 Р - 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:

$$\theta = T_o + \frac{2q^* H\sqrt{\tau}}{\lambda_н}\left(1 - \frac{1 - \exp - [(\rho C)_o \sqrt{\tau}]}{(\rho C)_o \sqrt{\tau}}\right.$$

где

$$(\rho C)_o = \frac{(\rho C)_н}{\rho C} = 0{,}45 \qquad \tau = \frac{\lambda_н \tilde{\tau} H^2}{(\rho C)_н} = \frac{0{,}135 \cdot 1800}{1615\,000 (7 \cdot 10^{-3})^2} = 3{,}1$$

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

б/ при спиральной прокладке нагревателя θ равно

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

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.:

$$\bar{T}_н = T_0 + \frac{q^* H \sqrt{\tau}}{\lambda_н}\left[1 - \frac{1}{(\rho c)_0 \sqrt{\tau}}\left(1 - \exp - (\rho c)_0 \sqrt{\tau}\right)\right.$$

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

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

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 To = 30 C, среднее по толщине занчение температуры нефти /а/ $\bar{T}н$ = 42,76 C, б/ $\bar{T}н$ = 45,76 C/, а также теплофизические параметры нефти и металлической трубы, гибкой нагревательной ленты

$$q^* = \frac{\lambda_н(\bar{T}_н - T_0)}{H\sqrt{\tau}\,F(\tau)} \quad ; \quad F(\tau) = 1 - \frac{1 - \exp\left[-(\rho c)_0 \sqrt{\tau}\right]}{(\rho c)_0 \sqrt{\tau}}$$

а/ при линейной прокладке нагревателей:

$$q^* = \frac{0{,}135(42{,}76 - 30)}{7 \cdot 10^{-3}\sqrt{3{,}07} \cdot 0{,}397} = 353{,}7 \ Вт/м^2$$

б/ при спиральной намотке нагревателя:

$$q^* = 437 \ Вт/м^2$$

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 паспартным данным подбирается нагревательное устройство.

а/ при линейной прокладке:

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

б/ при спиральной намотке:

$$P = 60 \ Вт/м^2$$

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 $\bar{T}_н = 40$ С, диаметр трубопровода $d = 0,108$м.

1. Вязкость нефти при $\bar{T}_н = 40$ С определяем по формуле 4.4.

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

где $a(1/град)$ - показатель крутизны вязкограммы.

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

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

$$\tilde{t} = \left(\frac{Q 8 \mu L}{\pi d^3 \Delta p \sqrt{\varkappa_н}}\right)^2 = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 1,43^{-2} \cdot 10^2}{3,14 \cdot 0,108^3 \cdot 10^4 \sqrt{8,353 \cdot 10^{-8}}} = 398,7c = 6,65 мин$$

3. Температуру нагревательного устройства определим из формулы 4.12. $\theta_н = 2\bar{T}_н - T_0 = 50°C$

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: $(\tau_0 = 0,12 \ кг/м^2)$

$$\Delta p = \frac{4L}{d}\tau_0 = \frac{4 \cdot 100 \cdot 0,12}{0,108} = 462,96 \ кг/м^2 = 0,46 \cdot 10^4 \ н/м^2$$

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

$$Q=\frac{\pi R^4 \Delta P}{8\mu l}\left[1-\frac{4}{3}\left(\frac{2l\tau_0}{R\Delta p}\right)+\frac{1}{3}\left(\frac{2l\tau_0}{R\Delta p}\right)^4\right]\approx$$

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

$$\approx 7,8\cdot 10^{-3}\ м^3/с$$

Пример расчета /к разделу №5/

Заданы: Время ~~работы электронагревательного устройства~~ необходимое для нагрева $\tilde{t}=1800°C$ начальная температура нефти $T_0=30$ С, температура негрева $\bar{T}_н=40$ 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

$\lambda_н=0,135\ \frac{Вт}{м\cdot град}$; $\lambda_i=0,0535$ Вт/м·град ; $\rho_н=850$ кг/м^3

$\rho_i=200$ кг/м^3 ; $\rho_н=7800$ кг/м^3 ; $\rho_л=2500$ кг/м^3 ; $C_н=1800\ \frac{Дж}{кг\cdot град}$

$C_i=740$ Дж/кг·град ; $C_м=460$ Дж/кг·град ; $C_л=700$ Дж/кг·град

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

Для этого проверим выполняется ли неравенство /формула 5.5/:

$$2a\sqrt{\tilde{t}}-1+e^{-2a\sqrt{\tilde{t}}}\geqslant\frac{4a^2\rho CH(\bar{T}_н-T_0)}{q^*}\ ;\quad a=\frac{\lambda_н B}{2\rho CH\sqrt{\varkappa_н}}$$

$$B=1+\sqrt{\frac{\lambda_i(\rho C)_i}{\lambda_н(\rho C)_н}}\ ;\quad \rho C=(\rho C)_м\frac{\delta}{H}+(\rho C)_л\frac{h}{H}$$

$a=0,013\ с^{-1/2}$; $B=1$; $(\rho C)=2,54\cdot 10^{-6}\ \frac{Дж}{м^3\cdot гр}$; $\varkappa_н=8,4\cdot 10^{-8}\ \frac{м^2}{с}$

а/ $q^*=354$ Вт/м

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

а) $0{,}44 \geqslant 0{,}35$

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

Условие /формула 5.5./ выполняется для а/ q^* =354 Вт/м и б/ q^* = 437 Вт/м.

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

$$2a\sqrt{t_*}-1+e^{-2a\sqrt{t_*}} = \frac{4a^2\rho cH(T_н-T_0)}{q^*}\exp 2a\left(\sqrt{\tilde{t}}-\sqrt{t_*}\right)$$

Обозначим комплекс $\frac{4a^2\rho cH(T_н-T_0)}{q^*} \Rightarrow N$

а/ N при q^*=354 Вт/м , $N = 0{,}35$

б/ N при q^*=437 Вт/м , $N = 0{,}28$

обозначим $2a\sqrt{t_*}$ через

т.к. $\tilde{t}$ =1800 сек, то $e^{2a\sqrt{\tilde{t}}} = 3{,}05$

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 $f_2(z) = Ne^{2a\sqrt{t}}e^{-z}$

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

Корни равны: случай а/ $z_a = 1{,}02$; случай б/ $z_б = 0{,}35$.

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

Таким образом заданных исходных парамтров прогрева можно достич менее, чем за 30 минут, в случае а/ t_* =25,12 мин, в случае б/ t_* =21,79 минут.