

Владимир Григорьевич Шухов

**Трубопроводы и их применение к
нефтяной промышленности**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 82-3
ББК 84-4
Ш98

Ш98 **Шухов В.**
Трубопроводы и их применение к нефтяной промышленности / Владимир Григорьевич
Шухов – М.: Книга по Требованию, 2023. – 44 с.

ISBN 978-5-521-38787-8

ISBN 978-5-521-38787-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг — не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель — вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания — решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

мѣненіе длины подѣ влияніемъ температуры; слѣдовательно, матеріалъ трубъ не долженъ страдать отъ перемены изгибовъ.

Въ первое время постройки нефтепроводовъ дѣлались попытки укладывать трубы по прямой, и черезъ опредѣленные промежутки устанавливали сальники, движеніе которыхъ покрывало измѣненіе длины линіи отъ температуры. Но такое устройство, помимо его большой стоимости (трубы укладывались на каткахъ), оказалось на практикѣ не достигающимъ своей цѣли: при слабой набивкѣ сальники давали течь, при сильномъ же подтягиваніи они переставали дѣйствовать, и трубы сбрасывались съ катковъ, причемъ линія ихъ прини-

мала волнообразный видъ. Работа бакинскихъ нефтепроводовъ въ теченіе 15 лѣтъ безъ всякаго ремонта показала, что трубы, уложенныя по слабой волнообразной линіи, нисколько не страдаютъ отъ дѣйствія перемены температуры.

Чтобы удовлетворить всѣмъ только-что перечисленнымъ условіямъ, необходимо употреблять *железные трубы*. Онѣ хотя и дороже чугунныхъ, но лучше удовлетворяютъ упомянутымъ выше требованіямъ; этимъ и объясняется, почему всѣ нефтепроводы въ Америкѣ и у насъ въ Баку построены изъ желѣзныхъ трубъ, соединенныхъ общезвѣстнымъ способомъ помощью муфтъ и нарыжныхъ концовъ.

I. Общая теорія трубопроводовъ.

Устройство трубопровода имѣетъ цѣлью достиженіе возможно дешевой стоимости перекачки извѣстной жидкости. Такъ какъ всякій проводъ представляетъ собою сооруженіе, въ которомъ существуетъ строгая зависимость между размѣрами устройства и стоимостью эксплуатаціи, то общая задача его проекта должна заключаться въ слѣдующемъ:

По данному разстоянію и по количеству перекачиваемой жидкости опредѣлить размѣры всѣхъ частей сооруженія подѣ тѣмъ условіемъ, чтобы ежегодные проценты съ затраченнаго на устройство капитала, сложенные со стоимостью эксплуатаціи, составляли возможно меньшую величину.

При удовлетворительномъ рѣшеніи этой задачи трубопроводъ будетъ наивыгоднѣйшій въ томъ смыслѣ, что стоимость перекачки по немъ единицы вѣса жидкости будетъ самая дешевая.

Основнымъ даннымъ для рѣшенія всѣхъ вопросовъ относительно трубопровода должно служить извѣстное практическое уравненіе гидравлики въ упрощенномъ видѣ.

$$Q = m \cdot \sqrt{\frac{d^5 \cdot h}{l}} \dots \dots \dots (1)$$

гдѣ Q — количество жидкости, перекачиваемой въ 1 мин. въ куб. футахъ,
 d — діаметръ трубъ въ дюймахъ,

h — высота напора въ футахъ столба перекачиваемой жидкости,

l — длина провода между двумя смежными станціями въ футахъ;

m — числовой коэффициентъ расхода, зависящій отъ природы жидкости; значеніе его въ разсматриваемомъ нами случаѣ различно для разныхъ жидкостей; кромѣ того, для продуктовъ нефти большого удѣльнаго вѣса онъ находится въ сильной зависимости отъ температуры.

Если Q представляетъ число кубич. фут. перекачиваемой въ теченіе сутокъ жидкости, то по даннымъ американскаго инженера *Наупта* числовое значеніе коэффициента m для нефти будетъ $m=5900$.

Выражая чрезъ Q минутный расходъ жидкости по трубопроводу въ кубическихъ футахъ, получимъ

$$m = 5900: (24.60) = 4,097.$$

По сдѣланнымъ нами надѣ нефтепроводами въ Баку наблюденіямъ, мы получили значеніе коэффициента m очень близкое къ тому, которое даетъ *Наупт*, а именно—въ среднемъ

$$m = 5750: (24.60) = 3,993.$$

Удѣльный вѣсъ нефти во время нашихъ продолжительныхъ опытовъ въ Баку, произведенныхъ въ разное время года, колебался отъ 0,867 до 0,871; показанія высоты напора дѣлались точнымъ ртутнымъ манометромъ системы *Шая*.

Для обыкновенной бакинской нефти въ нашихъ дальнѣйшихъ выводахъ мы будемъ принимать $m=4$, при Q —въ куб. фут. въ минуту и d —въ дюймахъ.

Для воды и керосина удѣльнаго вѣса 0,820 можно принять $m=5$ *); для нефтяныхъ остатковъ удѣльнаго вѣса 0,91 при температурѣ **) не ниже $+5^{\circ}C$ — $m=1$.

Переходимъ теперь къ отысканію размѣровъ всѣхъ частей трубопровода.

Таблица δ стѣнокъ желѣзныхъ трубъ можетъ быть опредѣлена съ достаточною для нашихъ выводовъ точностью помощью формулы

$$\delta = \frac{n \cdot d}{2 \cdot \tau} + c \dots (2)$$

гдѣ τ —допускаемое напряженіе разрыву для матеріала стѣнокъ въ пуд. на 1 кв. дм.,

n —давленіе въ трубахъ въ пудахъ на 1 кв. дм.,

c —постоянный прибавокъ, соответствующій глубинѣ рѣзбы.

Предположимъ, что уровни концевыхъ станцій одинаковы, и не будемъ разсматривать вліянія уклоновъ въ отдѣльныхъ звеньяхъ провода.

Обозначимъ черезъ

y —число станцій трубопровода,

l —разстояніе между ними въ футахъ,

$L=l \cdot y$ —полную длину линіи и

z —давленіе столба жидкости высотой въ 1 футъ на 1 кв. дюймъ.

Давленіе въ трубахъ $n=h \cdot z$, гдѣ h —высота напора въ футахъ.

Внося выраженіе h изъ уравн. (1) въ уравн. (2) и обозначая

$$\frac{\gamma}{2\tau} = \frac{1}{\alpha},$$

будемъ имѣть

$$\delta = \frac{Q^2 \cdot l}{\alpha \cdot m^2 \cdot d^3} + c \dots (2, a).$$

Такъ какъ толщина трубъ на всемъ разстояніи между двумя смежными станціями остается одинаковою, то объемъ желѣза, входящаго въ составъ трубопровода длиной L , будетъ

$$\pi \cdot (\delta + \delta) \cdot \delta \cdot L = \pi \cdot d \cdot \delta \cdot L + \pi \cdot \delta^2 \cdot L.$$

Для упрощенія дальнѣйшихъ выводовъ отбросимъ величину $\pi \cdot \delta^2 \cdot L$, какъ ничтожную по сравненію съ $\pi \cdot d \cdot \delta \cdot L$, тогда будемъ имѣть приближенное значеніе объема желѣза въ трубахъ:

$$\pi \cdot d \cdot \delta \cdot L = \frac{\pi \cdot Q^2 \cdot L^2}{\alpha \cdot m^2 \cdot d^3 \cdot y} + \pi \cdot c \cdot d \cdot L.$$

Обозначая черезъ Δ вѣсъ кубической единицы желѣза и принявъ

$$\pi \cdot \Delta : \alpha = p \text{ и } \pi \cdot \Delta \cdot c = q,$$

получимъ слѣдующее выраженіе вѣса трубъ, употребленныхъ на трубопроводъ:

$$S = \frac{p \cdot Q^2 \cdot L^2}{m^2 \cdot d^3 \cdot y} + q \cdot d \cdot L \dots (3).$$

Работа, производимая насосными машинами для перекачиванія жидкости на каждой станціи, въ 1 минуту будетъ

$$Q \cdot \gamma_1 \cdot h = \frac{Q^3 \cdot l}{d^5} \cdot \frac{\gamma_1}{m^2},$$

гдѣ γ_1 —вѣсъ кубической единицы перекачиваемой жидкости.

Обозначимъ черезъ t множитель, дающій изъ предыдущаго выраженія годовую работу, и черезъ f вѣсъ топлива, расходуемаго на единицу работы въ данной системѣ насосныхъ машинъ. Тогда годовой расходъ топлива по всей линіи выразится величиною

$$t \cdot f \cdot \frac{\gamma_1}{m^2} \cdot \frac{Q^3 \cdot l}{d^5} \cdot y$$

Стоимость этого топлива всегда можетъ быть сведена къ стоимости желѣза, употребленнаго на трубы. Слѣдовательно, если обозначимъ черезъ b мѣстное отношеніе цѣнъ одинаковыхъ вѣсовыхъ единицъ топлива и желѣза въ издѣліи трубъ, то будемъ имѣть величину годичнаго расхода топлива

$$b \cdot t \cdot f \cdot \frac{\gamma_1}{m^2} \cdot \frac{Q^3 \cdot l}{d^5} \cdot y = \frac{A}{m^2} \cdot \frac{Q^3 \cdot l}{d^5} \cdot y \dots (4),$$

выраженную въ вѣсѣ желѣза, равноцѣннаго желѣзу трубъ.

Стоимость насосныхъ машинъ и котловъ, служащихъ для перекачиванія жидкости, можетъ быть эмпирически выражена въ зависимости отъ производимой ими работы слѣдующимъ образомъ:

$$\kappa \cdot \frac{Q^3 \cdot l}{d^5} \cdot \frac{\gamma_1}{m^2} \text{—гдѣ } \kappa \text{—постоянное.}$$

*) Коэффициентъ m для воды принять, какъ для чугуновыхъ водопроводныхъ трубъ.

**) О вліяніи температуры на значеніе коэффициента m будетъ сказано ниже.

Раздѣлив цѣну машинъ и котловъ на цѣну единицы вѣса трубъ, будемъ имѣть слѣдующее выраженіе стоимости машинъ и котловъ въ вѣсѣ желѣза трубъ для всего трубопровода:

$$\frac{B}{m^2} \cdot \frac{Q^2 \cdot l}{d^5} \cdot y \dots \dots (5).$$

Стоимость всѣхъ работъ по оборудованію каждой станціи всѣми принадлежностями, независящую отъ d и l и выраженную въ принятой нами единицѣ вѣса трубъ, обозначимъ черезъ G ; для всего трубопровода эта стоимость будетъ:

$$G \cdot y \dots \dots (6).$$

Черезъ H назовемъ ежегодные расходы на содержание каждой станціи (вознагражденіе служебнаго персонала).

Ежегодный процентъ, идущій на уплату процентовъ и погашеніе затраченнаго на все устройство капитала, обозначимъ черезъ β . Тогда стоимость всѣхъ расходовъ по устройству и содержанию трубопровода, выраженную въ вѣсѣ желѣза трубъ, будетъ:

$$Z = (A + \beta \cdot B) \cdot \frac{Q^2 \cdot L}{m^2 \cdot d^5} + \beta \cdot \frac{p}{m^2} \cdot \frac{Q^2 \cdot L^2}{d^3 \cdot y} + \beta \cdot q \cdot d \cdot L + C \cdot y \dots \dots (7),$$

$$\text{гдѣ } C = \beta \cdot G + H.$$

Выше черезъ t былъ обозначенъ множитель, для перехода отъ минутной работы машинъ къ годовой *), слѣдовательно, годичный расходъ по трубопроводу представится въ видѣ $Q \cdot t$.

Стоимость сооруженія, отнесенная къ единицѣ расхода (1 куб. фут.) и единицѣ разстоянія перекачки (1 фут.), будетъ:

$$z = Z : (Q \cdot t \cdot L), \text{ или}$$

$$z = \frac{1}{t} \left[(A + \beta \cdot B) \cdot \frac{Q^2}{m^2 d^5} + \beta \cdot \frac{p}{m^2} \cdot \frac{Q \cdot L}{d^3 \cdot y} + \beta \cdot \frac{q \cdot d}{Q} + \frac{C \cdot y}{Q \cdot L} \right] \dots \dots (7, a)$$

Тотъ трубопроводъ будетъ наивыгоднѣйшій, для котораго эта стоимость z будетъ наименьшая, и задача проектированія трубопровода сводится, слѣдовательно, къ опредѣленію условий, при которыхъ z будетъ $\min$.

Такъ какъ z есть функція трехъ переменныхъ Q , d и y , связанныхъ между собою основнымъ уравненіемъ (1), то на практикѣ могутъ встрѣтиться слѣдующіе два вопроса:

1) По заданному диаметру d существующаго трубопровода найти наивыгоднѣйшіе для него расходъ Q и число станцій y .

2) По заданному расходу Q опредѣлить наивыгоднѣйшіе для этого расхода диаметръ d трубопровода, предполагающаго къ постройкѣ, и число станцій y для него.

Аналитическое рѣшеніе этихъ двухъ вопросовъ приводится къ нахожденію первыхъ частныхъ производныхъ выраженія (7, а) по y и Q или по d ; приравнявая нулю эти производныя, получаемъ нужнымъ намъ уравненія для рѣшенія поставленныхъ выше вопросовъ *)

Переходя къ аналитическому изысканію условій $z \min$, остановимся болѣе подробно на томъ частномъ случаѣ, когда для даннаго диаметра нужно отыскать наивыгоднѣйшій расходъ. Эта, наиболѣе простая и наиболѣе богатая интересными для практики теоретическими указаніями, постановка вопроса даетъ въ то же самое время рѣшеніе другого вопроса—о сравнительной выгодности трубопровода передъ другими способами перевозки жидкостей,—напр., наливными вагонами или судами.

Предположимъ сначала, что данъ расходъ Q и длина трубопровода L , и нужно найти d и y при условіи $z = \min$.

Тогда беремъ 1-ю частную производную отъ z по y (см. формулу 7, а) и приравниваемъ ее нулю:

$$\frac{\beta \cdot p}{m^2 \cdot d^3} \cdot \frac{Q \cdot L}{y^2} - \frac{C}{Q \cdot L} = 0, \text{ откуда}$$

$$y = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\beta \cdot p}{C}} \cdot \frac{Q \cdot L}{d^{3/2}} \dots \dots (8)$$

Затѣмъ беремъ 1-ю частную производную отъ z по d (см. формулу 7, а). Приравнявъ и ее нулю, получимъ:

$$\frac{5(A + B \cdot \beta)}{m^2} \cdot \frac{Q^2}{d^6} + \frac{3 \beta \cdot p \cdot L}{m^2 \cdot y} \cdot \frac{Q}{d^4} - \frac{\beta \cdot q}{Q} = 0$$

*) Разсматривая ближе составъ формулы (7, а), не трудно замѣтить, что результаты дифференцированія, полученные при той или другой постановкѣ вопроса, будутъ различны: если, напр., для известной трубы d найдены наивыгоднѣйшій для нея расходъ Q_1 , то тотъ же расходъ Q_1 можно еще дешевле перекачать по ѣмкой другой трубѣ d_2 ; по этой послѣдней, оказавшейся наивыгоднѣйшей для расхода Q_1 , опять можно будетъ еще дешевле перекачать ѣмкое новое большее количество Q_2 и т. д.

Къ статьѣ приложены двѣ таблицы и два графика стоимостей перекачки лудо-веревъ ветви, которые помогаютъ уяснить себѣ это.

*) Въ нашемъ примѣрѣ ниже принято $t = 360 \cdot 24 \cdot 60 = 518400$.

Внося въ это ур—іе для y его значеніе изъ (8), получимъ:

$$\frac{Q^3}{d^6} + \frac{3 m \cdot \beta}{5(A + \beta \cdot B)} \sqrt{\frac{\beta \cdot p \cdot C}{d}} \cdot \frac{Q}{d^2} - \frac{m^2 \cdot \beta \cdot q}{5(A + \beta \cdot B)} = 0 \dots (9).$$

Вторая частная производная отъ z по y и отъ z по d , обѣ болѣе нуля; слѣдовательно, z будетъ *min* при положительныхъ и дѣйствительныхъ значеніяхъ y и d , опредѣляемыхъ изъ (8) и (9).

Рѣшеніе уравненія (9), которое выходитъ 3-й степени относительно Q : d^2 , можетъ быть сдѣлано путемъ послѣдовательныхъ подстановокъ величины квадратнаго корня изъ d . При различныхъ значеніяхъ коэффициентовъ въ ур—іи (9), оно всегда должно дать одно положительное рѣшеніе. По найденной такимъ образомъ величинѣ Q : d^2 слѣдуетъ опредѣлить числовое значеніе d и внести его въ выраженіе (8); затѣмъ нужно взять ближайшее къ вычисленному цѣлое число за исполняемое число станцій и вторично опредѣлить d изъ уравненія (9); новое значеніе d можетъ быть уже принято за окончательное.

На основаніи полученныхъ для d и y числовыхъ значеній можно по формулѣ (7, а) опредѣлить стоимость перекачки z ; въ общемъ рѣшеніи получится

$$z = \frac{1}{t} \left[\frac{R}{\sqrt{Q}} + \frac{S}{\sqrt[4]{Q^3}} \right],$$

что вполне соответствуетъ тому выраженію для z , которое будетъ получено ниже и при условіи $d = const$.

Остановившись на извѣстномъ діаметрѣ трубъ, и переходя затѣмъ къ практикѣ эксплуатаціи будущаго трубопровода, приходится рѣшить вопросъ о томъ, что произойдетъ, если по проводу будутъ качать количество жидкости, большее противъ предполагаемаго при расчетѣ. Представимъ себѣ, напр., что для какого-либо города требуется провести воду на разстояніи десятка верстъ въ количествѣ 1,000,000 ведеръ въ сутки, достаточномъ для потребности города въ настоящее время. Когда затѣмъ потребность города по отношенію къ водѣ возрастетъ, что всегда необходимо имѣть въ виду при составленіи первоначальнаго проекта, то явится вопросъ, обойдется-ли перекачка по построенному трубопроводу, напр., 1,200,000 ведеръ въ сутки дороже или дешевле, чѣмъ для 1 милліона ведеръ.

Этотъ вопросъ можетъ быть разрѣшенъ, только зная наивыгоднѣйшій расходъ по данному трубо-

проводу, къ отысканію котораго мы теперь и перейдемъ. Для этого предположимъ, что L и d — величины данныя, а Q и y — искомыя.

Частная 1-я производная отъ z по y (см. форм. 7, а) дастъ для числа станцій y то же выраженіе (8), которое нами уже было получено выше при условіи постоянства расхода. Изъ этого выраженія видно, что при новыхъ условіяхъ постановки вопроса отношеніе $y:Q \cdot L$, какъ зависящее отъ d , будетъ постоянною величиною. Это нужно имѣть въ виду, когда будемъ брать 1-ю частную производную отъ z по Q . Взявши ее, и приравнявши нулю, получимъ:

$$\frac{A + B \cdot \beta}{m^2 \cdot d^3} \cdot 2 Q - \beta \cdot q \cdot d \cdot \frac{1}{Q^2} = 0, \quad \text{откуда}$$

$$Q = m^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta \cdot q}{A + B \cdot \beta}} \cdot d^2 \dots (10)$$

$$\text{или } d = \frac{Q^{1/2}}{m^{1/3}} \cdot \left(2 \cdot \frac{A + B \cdot \beta}{\beta \cdot q} \right)^{1/6} \dots (10 a).$$

Секундная скорость движенія жидкости по трубамъ будетъ:

$$v = \frac{12^3}{60} \cdot \frac{4 Q}{\pi d^2} = \frac{12^3 \cdot 4}{60 \pi} \cdot m^{2/3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot \frac{\beta \cdot q}{A + B \cdot \beta}} \dots (11).$$

Изъ (11) видно, что наивыгоднѣйшая скорость перекачки жидкости по данному трубопроводу есть функція только качества жидкости, добавочной толщинѣ трубъ на рѣзбу (т. е. s или q), стоимости топлива и машинъ, но не зависитъ отъ Q и d порознь. Стало быть, скорость жидкости въ трубахъ при однихъ и тѣхъ же мѣстныхъ условіяхъ должна быть величиною постоянною, независящею отъ количества перекачиваемой жидкости и діаметра трубопровода; иначе говоря, при данныхъ мѣстныхъ условіяхъ наивыгоднѣйшій расходъ Q по трубопроводу будетъ пропорціоналенъ только квадрату діаметра или площади поперечнаго сѣченія трубы.

Внося въ форму (7, а) величины d и y , опредѣленные изъ равенствъ (10) и (8), будемъ имѣть:

$$z = \frac{z}{t \cdot Q \cdot L} = \left(\frac{M}{\sqrt[3]{m} \cdot \sqrt{Q}} + \frac{N}{\sqrt{m} \cdot \sqrt[4]{Q^3}} \right) \cdot \frac{1}{t} \dots (12)$$

$$\text{гдѣ } M = \frac{3}{2^{5/6}} (\beta \cdot q)^{5/6} (A + \beta \cdot B)^{1/6} \dots (12, a)$$

$$N = 2^{3/4} \cdot \frac{\sqrt{\beta \cdot p \cdot C} \cdot \sqrt[4]{\beta \cdot q}}{\sqrt[4]{A + \beta \cdot B}} \dots (12, b),$$

т. е. M и N — коэффициенты, независящие от Q и d .

Формула (12) показывает, что стоимость перекачки единицы объема жидкости падает быстрее, чѣмъ корень квадратный изъ количества перекачиваемой жидкости. Слѣдовательно, всегда существуетъ такое количество жидкости, при которомъ перекачка ее по трубопроводу будетъ самая дешевая по сравнению со всѣми извѣстными намъ способами перевозки.

Въ самомъ дѣлѣ, при перевозкѣ жидкости наливными вагонами по жел. дор. существуетъ всегда предѣлъ удешевленію провоза, т. е. стоимость вагоновъ, тяги и смазки не уменьшается съ увеличеніемъ количества груза за извѣстными предѣлами. Поэтому, если даже не принимать во вниманіе стоимости расходовъ по содержанію пути и желѣзнодорожнаго персонала, а имѣть въ виду только одну стоимость новаго подвижного состава, легко найти предѣльное количество жидкости, для котораго оборудованіе желѣзной дороги наливными вагонами будетъ прямо невыгодно.

Пусть c будетъ стоимость вагона на единицу емкости перевозимой жидкости, v — скорость слѣдованія поѣздовъ (пробѣгъ вагона); тогда $c:v$ будетъ выражать стоимость вагона на единицу объема перевозимой въ данное время жидкости.

Стоимость паровоза и расходовъ на топливо, смазку и прислугу будетъ $b.v + b_1.v^3$.

Полная стоимость перевозки единицы емкости жидкости можетъ быть выражена уравненіемъ

$$z_1 = \frac{c}{v} + b.v + b_1.v^3.$$

Взявъ 1-ю производную отъ z_1 по v , и приравнявъ ее нулю, получимъ наивыгоднѣйшее значеніе скорости, независящее отъ количества жидкости. Слѣдовательно, *стоимость перевозки жидкости по жел. дор. не будетъ зависеть отъ количества перевозимой жидкости, а будетъ постоянна для единицы емкости ея.*

Такой же предѣлъ наивыгоднѣйшей стоимости перевозки, независящій отъ количества перевозимой жидкости, можетъ быть найденъ и для водяного пути при перевозкѣ наливными судами.

Если, слѣдовательно, данъ min. стоимости провоза товара по одному изъ существующихъ путей, то, зная числовыя величины коэффициентовъ M и N , всегда можно опредѣлить минимальную величину Q , при которой будетъ выгодно устройство

трубопровода параллельно существующему пути.

Выше было найдено (см. формулу 7), что общая стоимость трубопровода складается изъ 3-хъ отдѣльных факторовъ — стоимости машинъ и топлива, стоимости трубъ и стоимости оборудованія станцій.

Изъ выраженій (4) и (5) видно, что число силъ машины и количество потребнаго топлива возрастаютъ пропорціонально *кубу* расхода Q , а формулы (1) и (2) показываютъ, что напоръ и толщина стѣнокъ трубъ возрастаютъ пропорціонально *квадрату* расхода Q , стоимость же оборудованія и содержанія станцій совершенно не зависитъ отъ расхода жидкости.

Изъ этого слѣдуетъ, что только при непрерывной работѣ трубопроводъ можетъ дать наиболѣе экономичные результаты: допустимъ, что имѣются два трубопровода одинаковаго діаметра, съ одинаковымъ суточнымъ расходомъ жидкости, работающих 1 й непрерывно, а 2-й только 12 часовъ въ сутки; секунднй расходъ 2-го трубопровода, очевидно, будетъ вдвое больше 1-го, слѣдовательно, сила машинъ и часовой расходъ топлива его будутъ въ $2^3=8$ разъ больше перваго, а напоръ въ трубахъ и стоимость трубъ — въ $2^2=4$ разъ больше перваго.

Вышесказанныя соображенія надо имѣть въ виду при проектированіи трубопроводовъ, такъ какъ, задавшись при расчетѣ „для запаса“ меньшимъ противъ дѣйствительнаго числомъ рабочихъ часовъ и числомъ рабочихъ дней въ году (что, къ сожалѣнію, очень часто дѣлается), въ результатъ получится довольно значительное непроизводительное повышение стоимости всего устройства.

Практика этого дѣла въ Америкѣ и у насъ показала, что трубопроводы, построенные изъ хорошихъ трубъ и снабженные простыми, но солидными по конструкціи, насосами, работаютъ непрерывно въ теченіе многихъ лѣтъ, не требуя никакого ремонта.

Построенные въ Баку въ 1879 году нефтепроводы изъ американскихъ трубъ, работаютъ до сихъ поръ непрерывно, и трубы ихъ, несмотря на высокое рабочее давленіе (свыше 600 футовъ на 1 кв. дюймъ), не требовали пока никакого ремонта.

Насосы этихъ нефтепроводовъ поступали въ ремонтъ только для расточки цилиндровъ, каковой ремонтъ вполнѣ покрывался однимъ вапснымъ насосомъ при двухъ дѣйствующихъ.

Плохое качество воды въ Баку вызывало необходимость ремонта котловъ, даже при самомъ хоро-

лемъ уходѣ за ними, но и этотъ ремонтъ покрывался свободно запасомъ одной трети котловъ.

Если при проектированіи провода предполагается колебаніе въ доставкѣ товара (напр., въ одинъ мѣсяцъ на 20% больше, чѣмъ въ слѣдующій), то необходимо имѣть въ виду, что устройство *тран-*

мицъ для этого излишка, дающихъ возможность качать жидкость все-таки непрерывно и со среднимъ расходомъ, при проводахъ значительной длины будетъ выгодно, чѣмъ устройство всего трубопровода по временному максимальному расходу.

II. Числовые коэффициенты, опредѣляющіе стоимость перекачки жидкости по трубопроводу.

Для лучшаго уясненія общей теоріи трубопроводовъ, изложенной нами выше, перейдемъ теперь къ примѣрному расчету коэффициентовъ, опредѣляющихъ стоимость перекачки по трубопроводу, причемъ за перекачиваемую жидкость примемъ нефть. Для нея

$m = 4$ — практический коэффициентъ расхода,

$\delta = 0,01$ пуд. (1 : 2,5 фунт.) — давленіе столба жидкости въ 1 футъ на 1 кв. дюймъ площади основанія;

$\gamma_1 = 1,5$ пуд. — вѣсъ 1 куб. фута нефти.

Пусть далѣе

$A = 0,093$ пуд. — вѣсъ погоннаго фута желѣза, имѣющаго въ сѣченіи 1 кв. дюймъ;

$\tau = 300$ пуд. на 1 кв. дм. — допускаемое напряженіе желѣза трубъ на разрывъ.

Тогда

$$p = \frac{\pi \cdot A}{\alpha} = \frac{\pi \cdot A \cdot \gamma}{2 \tau} = \text{около } \frac{1}{2 \cdot 10^3}$$

Примемъ далѣе добавочную толщину стѣнокъ трубъ на рѣзбу, неучаствующую въ сопротивленіи напору,

$$c = \frac{1}{8} \text{ дюйма, тогда}$$

$$q = \pi \cdot A \cdot c = 0,037.$$

Большинство станцій, какъ американскихъ нефтепроводовъ, такъ и построенныхъ у насъ въ Баку, оборудованы насосными машинами прямого дѣйствія сдвоеннаго типа. Такія машины, снабженные цилиндрами расширенія, при расходе одного пуда угля въ топкѣ парового котла способны давать эффективную работу отъ 350000 до 650000 пудофутовъ, въ зависимости отъ ихъ конструкціи. Для

большей надежности расчета мы примемъ что однимъ пудомъ нефти насосы даютъ работу въ 720000 пудофутовъ,

$$f = 1 : 720000,$$

что соответствуетъ производительности въ 400000 пудофут. на 1 пудъ угля. При этихъ условіяхъ будетъ тратиться около 3 фунтовъ нефти или 5,4 фунтовъ угля на дѣйствительную силу въ часъ.

Если нефтепроводъ рассчитывается на работу въ теченіе цѣлаго года, то

$$t = 360 \cdot 24 \cdot 60 = 518400 \text{ мин.}$$

Стоимость желѣзныхъ трубъ съ доставкой на мѣсто пусть обходится 7 рублей съ пуда, а стоимость топлива (одного пуда нефти или эквивалентнаго ему количества угля) предположимъ равною при дешевомъ топливѣ 0,07 рубл., *) тогда $b = 0,01$, при среднемъ топливѣ 0,14 „ „ = 0,02, при дорогомъ топливѣ 0,21 „ „ = 0,03.

Соотвѣтственно этимъ значеніямъ коэф — та b , по формулѣ (4) получится

$$\begin{aligned} A = t \cdot b \cdot f \cdot \gamma_1 &= 0,0108 \text{ при дешевомъ топливѣ,} \\ &= 0,0316 \text{ „ среднемъ „} \\ &= 0,0324 \text{ „ дорогомъ „} \end{aligned}$$

Стоимость котловъ можетъ быть принята въ 80 руб. съ дѣйствительной силы, машинъ-компаундъ — около 150 рублей; стоимость зданій для машины и котловъ обходится около 120 рублей съ дѣйствительной силы. Въ суммѣ расходы по оборудованію машинъ и котловъ вмѣстѣ со зда-

*) Изъ такихъ приблизительно условій находятся районы существующихъ нефтепроводовъ.

ніями можуть быть приняты съ достаточною точностью въ 350 рублей на дѣйствительную силу, т. е.

$$k = 350 \text{ руб.}$$

Для полученія числа дѣйствительныхъ силъ насосныхъ машинъ и котловъ по всей линіи, необходимо полученное ранѣе выраженіе производимой работы (см. форм. 5-ю) въ пудфутахъ въ 1 минуту раздѣлить на 15.60; тогда получимъ

$$\frac{\gamma_1}{m^2} \cdot \frac{Q^3 \cdot L}{d^5} - \frac{1}{15.60} = \frac{1}{600 \cdot m^2} \cdot \frac{Q^3 \cdot L}{d^5}$$

Стоимость машинъ и котловъ, выраженная въ пудахъ желѣза трубъ, при цѣнѣ послѣднихъ въ 7 рублей за пудъ, будетъ

$$\frac{350}{7.600 \cdot m^2} \cdot \frac{Q^3 \cdot L}{d^5},$$

$$\text{т. е.} \quad B = \frac{350}{7.600} = 0,0833.$$

Считая 10% на капитализацію и погашеніе, т. е.

$$\beta = 0,10,$$

будемъ имѣть ежегодную стоимость машинъ и котловъ со зданіями для нихъ:

$$\frac{\beta \cdot B}{m^2} \cdot \frac{Q^3 \cdot L}{d^5} = \frac{0,00833}{m^2} \cdot \frac{Q^3 \cdot L}{d^5}$$

Коэффициентъ $(A + \beta \cdot B)$ въ выраженіи (7) и послѣдующихъ соотвѣтственно измѣненію стоимости топлива будетъ имѣть слѣдующія значенія:

- 1) Дешовое топливо $0,0108 + 0,00833 = \text{около } 0,02$.
- 2) Среднее топливо $0,0216 + 0,00833 = \text{около } 0,03$.
- 3) Дорогое топливо $0,0324 + 0,00833 = \text{около } 0,04$.

Постоянные расходы по станціямъ, независящіе отъ d и L трубопровода, будутъ состоять изъ резервуаровъ и разныхъ къ нимъ принадлежностей стоимостью въ 25,000 рублей; 10% отъ нихъ составлять 2,500 рублей, слѣдовательно, въ выраженіи (6) получится:

$$\beta \cdot G = 2500 : 7.$$

Ежегодные расходы на содержаніе станцій или вознагражденіе служебнаго персонала примемъ въ 4,500 рублей, тогда

$$H = 4500 : 7,$$

и числовое значеніе коэффициента C въ форм. 7, равнаго $\beta \cdot G + H$, будетъ:

$$C = (2500 + 4500) : 7 = 1000.$$

Внося въ выраженіе (7,а) полученные выше числовыя значенія коэффициентовъ, получимъ стоимость перекачки одного куб. фута нефти на разстояніи одного фута по трубопроводу, выраженную въ пудахъ желѣза трубъ:

$$z = \frac{1}{t} \left[0,03 \cdot \frac{Q^2}{m^2 \cdot d^5} + \frac{0,1}{2 \cdot 10^5} \cdot \frac{Q \cdot L}{m^2 \cdot d^3 \cdot y} + \frac{0,0037 \cdot d}{Q} + \frac{1000 \cdot y}{Q \cdot L} \right] \dots (13)$$

Это выраженіе позволяетъ опредѣлить вліяніе каждаго изъ факторовъ на общую стоимость перекачки нефти по трубопроводу.

Выше было получено слѣдующее выраженіе для величинъ скорости перекачки жидкостей по трубопроводамъ, соотвѣтствующее наименьшей стоимости сооруженія (см. форм. 11):

$$v = 3,053 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,5 \cdot \beta \cdot q}{A + \beta \cdot B}} \cdot m^{2/3} = K \cdot m^{2/3} \dots \dots \dots (14)$$

Для разныхъ жидкостей коэффициенты A и B измѣняются сообразно съ величинами δ и δ_1 ; но эти измѣненія очень слабо отражаются на конечномъ результатѣ; поэтому вставляемъ въ послѣднюю формулу вмѣсто коэффициентовъ $\beta \cdot q$ и $(A + \beta \cdot B)$ ихъ числовыя значенія и, измѣняя m сообразно перекачиваемой жидкости, принимаемъ, что форм. (14) даетъ намъ наибыводнѣйшую величину скорости v для различныхъ жидкостей.

Коэффициентъ K въ форм. 14 будетъ имѣть слѣдующія значенія:

- 1) при дешовомъ топливѣ, т. е. при $b = 0,01$,

$$K = 3,053 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,5 \cdot 0,1 \cdot 0,037}{0,02}} = 1,381;$$

- 2) при среднемъ топливѣ, т. е. при $b = 0,02$,

$$K = 3,053 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,5 \cdot 0,1 \cdot 0,037}{0,03}} = 1,206;$$

- 3) при дорогомъ топливѣ, т. е. при $b = 0,03$,

$$K = 3,053 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,5 \cdot 0,1 \cdot 0,037}{0,04}} = 1,096.$$

На основаніи этихъ значеній для коэффициента K

при различной стоимости топлива вычислены приведенные ниже величины наивыгоднейших скоростей для воды *) и керосина, для нефти и для нефтяных остатков.

Таблица наивыгоднейших скоростей
в футах в 1 секунду.

Т а б л и ц а I-я.

Родъ перекачки ваемой жидкости.	<i>m</i>	Дешевое топливо <i>b=0,01**</i> $A+\beta.B=0,02$	Дорогое топливо <i>b=0,03</i> $A+\beta.B=0,04$	Средняя стои- мость топлива <i>b=0,02</i> $A+\beta.B=0,03$
Вода или ке- росинъ. . .	5	4,04	3,21	3,53
Нефть. . . .	4	3,48	2,76	3,04
Нефтяные ос- татки. . . .	1	1,38	1,10	1,21

Формула (12) при средней стоимости топлива получить видъ:

$$z = \frac{Z}{t \cdot Q \cdot L} = \frac{1}{t} \left(\frac{0,00557}{\sqrt{Q}} + \frac{0,0111}{\sqrt[4]{Q^3}} \right) \dots (15).$$

Соответственно принятымъ въ этомъ примѣрѣ числовымъ даннымъ, выраженіе (15) представляетъ собою наивыгоднейшую стоимость перекачки одного кубическаго фута нефти на одинъ футъ разстоянія, причемъ стоимость эта выражена въ пудахъ желѣза трубъ, а *Q* дано въ кубическихъ футахъ въ 1 минуту. Для опредѣленія стоимости перекачки въ минуту пудверсты въ копѣйкахъ необходимо *z*, полученное изъ форм. (15),

умножить на 700 (цѣна 1 пуда трубъ въ коп.),
умножить на 3500 (футовъ въ 1 верстѣ),
раздѣлить на 1,5 (вѣсъ 1 куб. фута нефти въ пуд.).
Сдѣлавъ это, и подставивъ $t = 518400$, полу-
чимъ:

$$z = \frac{3500 \cdot 700}{518400 \cdot 1,5} \cdot \left(\frac{0,00557}{\sqrt{Q}} + \frac{0,0111}{\sqrt[4]{Q^3}} \right), \text{ или}$$

$$z = 3,15 \left(\frac{0,00557}{\sqrt{Q}} + \frac{0,00111}{\sqrt[4]{Q^3}} \right),$$

*) Коэффициентъ *m* для воды принять, какъ для чугуновыхъ трубъ водопроводовъ.

**) Составляя такую же формулу стоимости приблизительно къ чугуновымъ трубамъ, найдемъ, что отношеніе *b* стоимости топлива къ цѣнѣ чугуна трубъ будетъ больше, но настолько же почти увеличится и вѣсъ чугуновыхъ трубъ (въслѣдствіе уменьшенія коэффиціента прочнаго сопротивленія металла *t* и увеличенія свободной добавочной толщины трубъ *c*). Въ результатѣ окажется, что при чугуновыхъ трубахъ отношеніе ежегодныхъ расходовъ на топливо къ процентамъ по расходамъ на трубы останется приблизительно такое же, какъ и при желѣзныхъ.

и окончательно стоимость перекачки въ минуту пудверсты нефти въ копѣйкахъ будетъ равна:

$$z = \frac{0,175}{\sqrt{Q}} + \frac{0,035}{\sqrt[4]{Q^3}} \text{ коп.} \dots (16).$$

При тѣхъ же принятыхъ числовыхъ данныхъ формула (10) даетъ:

$$Q = d^2 \dots (16, a).$$

На основаніи формулъ (1), (8) и (16a) имѣемъ:

$$l = \frac{L}{y} = \frac{\sqrt{C} \cdot d^{3/2}}{\sqrt{\beta \cdot p} \cdot d^2}$$

$$\text{или } l = \text{около } \frac{179000}{\sqrt{d}} \text{ фут.}$$

$$h = \frac{l}{m \cdot d} = \frac{179000}{16} \cdot \frac{1}{d^{3/2}}$$

$$\text{или } h = \text{около } \frac{11200}{d^{3/2}} \text{ фут.}$$

Откуда находимъ паденіе гидравлическаго напора въ трубахъ при условіи наивыгоднейшей эксплуатаціи трубопровода

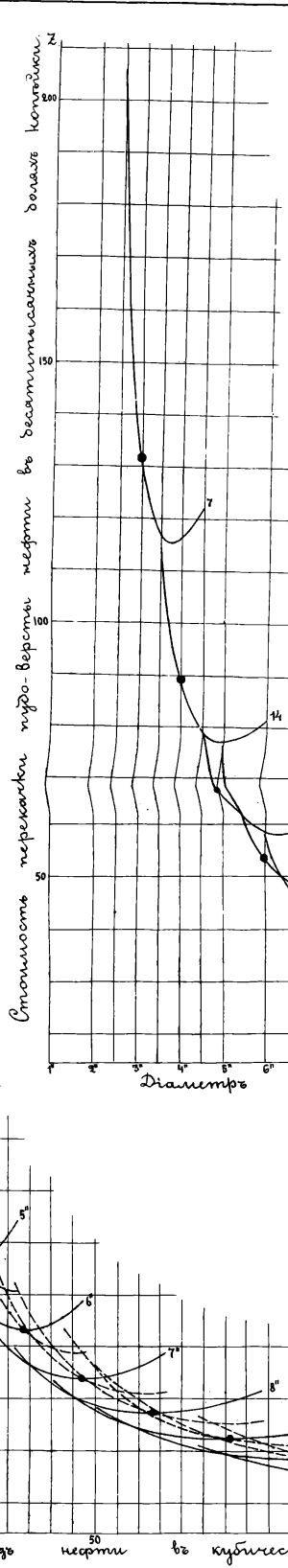
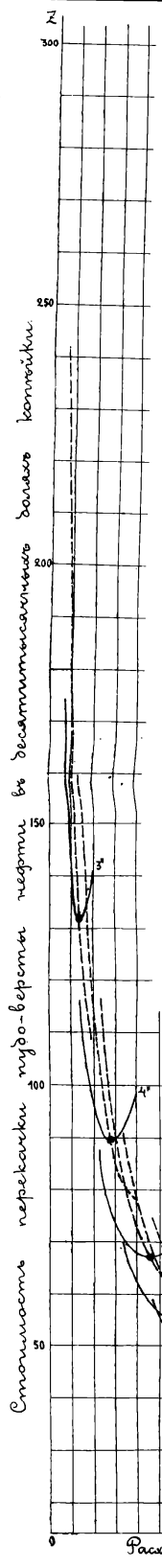
$$i = \frac{h}{l} = \frac{11200}{179000} \cdot \frac{1}{d} = \text{около } \frac{0,063}{d} \dots (16, b).$$

Въ таблицѣ II-й приведены значенія для *Q* и

Таблица II-я.

Диаметръ трубы <i>d</i> въ дюймахъ.	Расходъ по формулѣ 16, а.		Стоимость перекачки пуд- версты нести въ минуту.	
	кубическихъ футовъ въ 1 минуту.	Милліонъ пудовъ въ годъ.	По формулѣ (16) въ сотыхъ доляхъ копѣйки.	Въ копѣй- кахъ.
3	9	6,998	583* + 676 = 1259	1:79
4	16	12,442	438 + 437 = 875	1:114
5	25	19,440	350 + 313 = 663	1:151
6	36	27,994	292 + 239 = 531	1:188
7	49	38,102	250 + 189 = 439	1:228
8	64	49,766	219 + 155 = 374	1:267
9	81	62,986	194 + 130 = 324	1:308
10	100	77,760	175 + 111 = 286	1:349
12	144	111,974	146 + 54 = 200	1:500

*) Первое слагаемое относится къ выраженію $0,175: \sqrt{Q}$ въ формулѣ 16-й, а второе къ выраженію $0,035: \sqrt[4]{Q^3}$.



Кемане Б.Т. Умисва

III "Поробово" и нм применение в негнутах перекатки

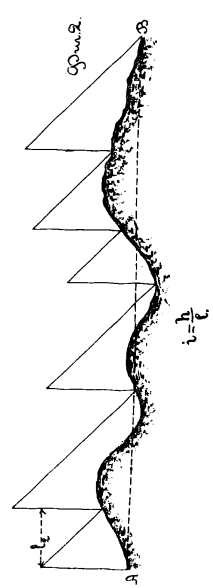
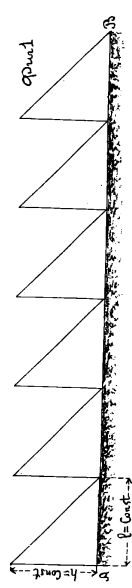


График II

График I

