ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

**ОПТИМИЗАЦИЯ ДИАМЕТРА ТРУБОПРОВОДА**

**Цель работы:** закрепление теоретических знаний, полученных при изучении методов линейного математического программирования.

В ходе лабораторной работы будет найден оптимальный (по критерию эффективности - минимуму годовых затрат) внутренний диаметр трубопровода при помощи табличного процессора (ТП) Microsoft Excel. Также будет исследовано влияние на целевую функцию изменения значений удельных капвложений в трубопровод и стоимости электроэнергии.

**Постановка оптимизационной задачи:** необходимо найти оптимальный внутренний диаметр трубопровода dB, выбрав в качестве критерия эффективности минимум годовых затрат Z, требуемых для функционирования системы «ТРУБОПРОВОД-НАСОС».

С уменьшением внутреннего диаметра dB снижается толщина стенки трубопровода S, его масса M и капитальные вложения в паропровод KTP.

Однако, уменьшение диаметра при неизменном расходе жидкости по уравнению неразрывности ведёт к увеличению скорости жидкости ω и соответствующему росту гидравлического сопротивления p. Это вызывает увеличение напора насоса H и его мощности N.

Таким образом, при снижении диаметра трубопровода растут эксплуатационные издержки U, равные годовой стоимости потребляемой насосом электроэнергии. Изменением капвложений в насос пренебречь.

Тогда *целевая функция (ЦФ)* имеет следующий вид:

Z = EН · KTP + U → min.

**Математическое описание задачи:**

1. Внутренний диаметр трубопровода, м зависит от принятой скорости жидкости:

,

где υ – кинематическая вязкость, π – иррациональное число «Пи».

1. Толщина стенки, м

*S = 0,05 · dB*

1. Наружный диаметр, м

*dH = dB + 2 · S*

1. Масса трубопровода, т



1. Капитальные вложения в трубопровод, руб.

*KTP = CTP · M*

1. Гидравлическое сопротивление на преодоление местных потерь (задан коэффициент местных потерь ξM) и трения (задан коэффициент трения λTP), кПа



1. Мощность насоса, кВт



1. Годовая потребляемая насосом электроэнергия, кВт∙ч

*E = N · h,*

где h - число часов использования насоса в году

1. Годовые эксплуатационные издержки, руб.

*U = E · CE*

1. Годовые приведенные затраты, руб.

*Z = EН + КТР + U,*

где EН – нормативный коэффициент эффективности капвложений.

**Результаты расчёта в Excel:**

*1. С использованием электронных таблиц Еxcel для нескольких вариантов скорости жидкости ω последовательно:*

1) рассчитаны капитальные вложения в трубопровод KTP; построена графическая зависимости изменения KTP от ω и проанализирован её характер;

2) рассчитаны годовые эксплуатационные издержки U; построена графическая зависимость изменения U от ω и проанализирован её характер;

3) рассчитаны годовые приведённые затраты Z. Построена графическая зависимость изменения Z от скорости ω.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | ω, м/с | dв, м | S, м | dн, м | М, т | Ктр, руб | Δр, кПа | N, кВт | Е, кВт\*ч | U, руб | Z, руб |
| **G, кг/с** | 60,000 |  | 2,000 | 0,195 | 0,010 | 0,215 | 8,655 | 216365,625 | 40,862 | 2,851 | 11403,329 | 11403,329 | 43858,173 |
| ηн | 0,860 |  | 2,025 | 0,194 | 0,010 | 0,214 | 8,548 | 213694,444 | 42,061 | 2,935 | 11738,076 | 11738,076 | 43792,243 |
| **l, м** | 175,000 |  | 2,050 | 0,193 | 0,010 | 0,212 | 8,444 | 211088,415 | 43,281 | 3,020 | 12078,463 | 12078,463 | 43741,725 |
| ξм | 7,000 |  | 2,075 | 0,192 | 0,010 | 0,211 | 8,342 | 208545,181 | 44,521 | 3,106 | 12424,519 | 12424,519 | 43706,296 |
| λтр | 0,015 |  | 2,100 | 0,191 | 0,010 | 0,210 | 8,243 | 206062,500 | 45,782 | 3,194 | 12776,269 | 12776,269 | 43685,644 |
| Стр, руб/т | 25000,000 |  | 2,125 | 0,190 | 0,009 | 0,209 | 8,146 | 203638,235 | 47,063 | 3,283 | 13133,741 | 13133,741 | 43679,476 |
| СE, руб/кВт\*ч | 1,000 |  | 2,150 | 0,189 | 0,009 | 0,207 | 8,051 | 201270,349 | 48,364 | 3,374 | 13496,961 | 13496,961 | 43687,513 |
| **h, час** | 4000,000 |  | 2,175 | 0,187 | 0,009 | 0,206 | 7,958 | 198956,897 | 49,686 | 3,466 | 13865,956 | 13865,956 | 43709,491 |
| Ен | 0,150 |  | 2,200 | 0,186 | 0,009 | 0,205 | 7,868 | 196696,023 | 51,029 | 3,560 | 14240,753 | 14240,753 | 43745,157 |
| ρст, кг/м3 | 7850,000 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Адрес минимума | N7 |
| **υ, м3/кг** | 0,001 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Значение минимума | 43679,476 |
| **π** | 3,142 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **Δω (**шаг) | 0,025 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**Графики по результатам расчётов:**

Из графиков видно, что годовые эксплуатационные издержки имеют прямую линейную зависимость от скорости жидкости - чем она больше, тем больше издержки, поскольку они зависят от годовой потребляемой энергии.

При этом капиталовложения в трубы имеют имеют также линейную зависимость, но в «противоположную сторону». Чем больше скорость жидкости, тем меньше становятся капиталовложения, поскольку капиталовложения зависят от массы трубопровода, которая уменьшается с увеличение скорости жидкости.

1. Оптимальный вариант скорости жидкости и диаметра трубы

Оптимальным вариантом (по критерию минимума целевой функции [годовые затраты]) является скорость жидкости ωОПТ = 2,125 м/с и dОПТ = 0,19 м (внутренний) и 0,209 м (внешний). При таких значениях параметров годовые издержки будут равны 43679,476 руб..

1. Изменить значения удельных капвложений в трубопровод CTP (уменьшить в 2–3 раза и увеличить в 2–3 раза относительно заданного) и повторить вариантный расчёт оптимальной скорости.

**Результат расчёта, уменьшив удельные капиталовложение в 3 раза:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | ω, м/с | dв, м | S, м | dн, м | М, т | Ктр, руб | Δр, кПа | N, кВт | Е, кВт\*ч | U, руб | Z, руб |
| **G, кг/с** | 60,000 |  | 1,400 | 0,234 | 0,012 | 0,257 | 12,364 | 103031,250 | 17,872 | 1,247 | 4987,649 | 4987,649 | 20442,336 |
| **ηн** | 0,860 |  | 1,425 | 0,232 | 0,012 | 0,255 | 12,147 | 101223,684 | 18,618 | 1,299 | 5195,672 | 5195,672 | 20379,225 |
| **l, м** | 175,000 |  | 1,450 | 0,230 | 0,011 | 0,252 | 11,937 | 99478,448 | 19,381 | 1,352 | 5408,624 | 5408,624 | 20330,391 |
| **ξм** | 7,000 |  | 1,475 | 0,228 | 0,011 | 0,250 | 11,735 | 97792,373 | 20,162 | 1,407 | 5626,537 | 5626,537 | 20295,393 |
| **λтр** | 0,015 |  | 1,500 | 0,226 | 0,011 | 0,248 | 11,540 | 96162,500 | 20,961 | 1,462 | 5849,442 | 5849,442 | 20273,817 |
| **Стр, руб/т** | 8333,333 |  | 1,525 | 0,224 | 0,011 | 0,246 | 11,350 | 94586,066 | 21,777 | 1,519 | 6077,373 | 6077,373 | 20265,283 |
| **СE, руб/кВт\*ч** | 1,000 |  | 1,550 | 0,222 | 0,011 | 0,244 | 11,167 | 93060,484 | 22,612 | 1,578 | 6310,360 | 6310,360 | 20269,432 |
| **h, час** | 4000,000 |  | 1,575 | 0,220 | 0,011 | 0,242 | 10,990 | 91583,333 | 23,465 | 1,637 | 6548,434 | 6548,434 | 20285,934 |
| **Ен** | 0,150 |  | 1,600 | 0,219 | 0,011 | 0,240 | 10,818 | 90152,344 | 24,337 | 1,698 | 6791,628 | 6791,628 | 20314,479 |
| **ρст, кг/м3** | 7850,000 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Адрес минимума | N7 |
| **υ, м3/кг** | 0,001 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Значение минимума | 20265,283 |
| **π** | 3,142 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **Δω(шаг)** | 0,025 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Таким образом, оптимальным вариантом по критерию эффективности - минимуму годовых затрат, является скорость жидкости ωОПТ = 1,525 м/с и dОПТ = 0,224 м (внутренний) и 0,246 м (внешний). Целевая функция затрат принимает при этих параметрах значение 20256,283 руб.. В результате уменьшения удельных капиталовложений до 8333,33 руб/т оптимальный диаметр увеличился, поскольку уменьшилась оптимальная скорость течения жидкости.

**Графики по результатам расчёта с удельными кап. вложениями, уменьшенными в три раза:**

**Результат расчёта, увеличив удельные капиталовложение в 3 раза:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | ω, м/с | dв, м | S, м | dн, м | М, т | Ктр, руб | Δр, кПа | N, кВт | Е, кВт\*ч | U, руб | Z, руб |
| **G, кг/с** | 60,000 |  | 2,900 | 0,162 | 0,008 | 0,179 | 5,969 | 447653,017 | 97,443 | 6,798 | 27193,274 | 27193,274 | 94341,226 |
| **ηн** | 0,860 |  | 2,925 | 0,162 | 0,008 | 0,178 | 5,918 | 443826,923 | 99,427 | 6,937 | 27747,187 | 27747,187 | 94321,226 |
| **l, м** | 175,000 |  | 2,950 | 0,161 | 0,008 | 0,177 | 5,868 | 440065,678 | 101,436 | 7,077 | 28307,634 | 28307,634 | 94317,486 |
| **ξм** | 7,000 |  | 2,975 | 0,160 | 0,008 | 0,176 | 5,818 | 436367,647 | 103,467 | 7,219 | 28874,636 | 28874,636 | 94329,783 |
| **λтр** | 0,015 |  | 3,000 | 0,160 | 0,008 | 0,176 | 5,770 | 432731,250 | 105,523 | 7,362 | 29448,216 | 29448,216 | 94357,904 |
| **Стр, руб/т** | 75000,000 |  | 3,025 | 0,159 | 0,008 | 0,175 | 5,722 | 429154,959 | 107,602 | 7,507 | 30028,397 | 30028,397 | 94401,641 |
| **СE, руб/кВт\*ч** | 1,000 |  | 3,050 | 0,158 | 0,008 | 0,174 | 5,675 | 425637,295 | 109,704 | 7,654 | 30615,200 | 30615,200 | 94460,794 |
| **h, час** | 4000,000 |  | 3,075 | 0,158 | 0,008 | 0,173 | 5,629 | 422176,829 | 111,831 | 7,802 | 31208,649 | 31208,649 | 94535,173 |
| **Ен** | 0,150 |  | 3,100 | 0,157 | 0,008 | 0,173 | 5,584 | 418772,177 | 113,981 | 7,952 | 31808,765 | 31808,765 | 94624,591 |
| **ρст, кг/м3** | 7850,000 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Адрес минимума | N4 |
| **υ, м3/кг** | 0,001 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Значение минимума | 94317,486 |
| **π** | 3,142 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **Δω(шаг)** | 0,025 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Таким образом, оптимальным вариантом по критерию эффективности - минимуму годовых затрат, является скорость жидкости ωОПТ = 2,95 м/с и dОПТ = 0,161 м (внутренний) и 0,177 м (внешний). Целевая функция затрат принимает при этих параметрах значение 94317,486 руб.. В результате увеличения удельных капиталовложений до 75000 руб/т оптимальный диаметр уменьшился, поскольку увеличилась оптимальная скорость течения жидкости.

**Графики по результатам расчёта с удельными кап. вложениями, увеличенными в три раза:**

1. Построить график изменения оптимальной скорости ωОПТ от CTP.

С увеличением удельных капиталовложений растёт и оптимальная скорость движений жидкостей.

1. Изменить значения стоимости электроэнергии CE (уменьшить в 2–3 раза и увеличить в 2–3 раза относительно заданного значения в табл. 1) при постоянном значении CTP.

**Результат расчёта, уменьшив стоимость электроэнергии в 3 раза:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | ω, м/с | dв, м | S, м | dн, м | М, т | Ктр, руб | Δр, кПа | N, кВт | Е, кВт\*ч | U, руб | Z, руб |
| **G, кг/с** | 60,000 |  | 2,900 | 0,162 | 0,008 | 0,179 | 5,969 | 149217,672 | 97,443 | 6,798 | 27193,274 | 9064,425 | 31447,075 |
| **ηн** | 0,860 |  | 2,925 | 0,162 | 0,008 | 0,178 | 5,918 | 147942,308 | 99,427 | 6,937 | 27747,187 | 9249,062 | 31440,409 |
| **l, м** | 175,000 |  | 2,950 | 0,161 | 0,008 | 0,177 | 5,868 | 146688,559 | 101,436 | 7,077 | 28307,634 | 9435,878 | 31439,162 |
| **ξм** | 7,000 |  | 2,975 | 0,160 | 0,008 | 0,176 | 5,818 | 145455,882 | 103,467 | 7,219 | 28874,636 | 9624,879 | 31443,261 |
| **λтр** | 0,015 |  | 3,000 | 0,160 | 0,008 | 0,176 | 5,770 | 144243,750 | 105,523 | 7,362 | 29448,216 | 9816,072 | 31452,635 |
| **Стр, руб/т** | 25000,000 |  | 3,025 | 0,159 | 0,008 | 0,175 | 5,722 | 143051,653 | 107,602 | 7,507 | 30028,397 | 10009,466 | 31467,214 |
| **СE, руб/кВт\*ч** | 0,333 |  | 3,050 | 0,158 | 0,008 | 0,174 | 5,675 | 141879,098 | 109,704 | 7,654 | 30615,200 | 10205,067 | 31486,931 |
| **h, час** | 4000,000 |  | 3,075 | 0,158 | 0,008 | 0,173 | 5,629 | 140725,610 | 111,831 | 7,802 | 31208,649 | 10402,883 | 31511,724 |
| **Ен** | 0,150 |  | 3,100 | 0,157 | 0,008 | 0,173 | 5,584 | 139590,726 | 113,981 | 7,952 | 31808,765 | 10602,922 | 31541,530 |
| **ρст, кг/м3** | 7850,000 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Адрес минимума | N4 |
| **υ, м3/кг** | 0,001 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Значение минимума | 31439,162 |
| **π** | 3,142 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **Δω** | 0,025 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Таким образом, оптимальным вариантом по критерию эффективности - минимуму годовых затрат, является скорость жидкости ωОПТ = 2,95 м/с и dОПТ = 0,161 м (внутренний) и 0,177 м (внешний). Целевая функция затрат принимает при этих параметрах значение 31439,162 руб.. В результате уменьшения стоимости электроэнергии до значения 0,333 руб/кВт\*ч оптимальный диаметр уменьшился, поскольку увеличилась оптимальная скорость течения жидкости

**Графики по результатам расчёта со стоимость электроэнергии, уменьшенными в три раза:**

**Результат расчёта, увеличив стоимость электроэнергии в 3 раза:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | ω, м/с | dв, м | S, м | dн, м | М, т | Ктр, руб | Δр, кПа | N, кВт | Е, кВт\*ч | U, руб | Z, руб |
| **G, кг/с** | 60,000 |  | 1,500 | 0,226 | 0,011 | 0,248 | 11,540 | 288487,500 | 20,961 | 1,462 | 5849,442 | 17548,327 | 60821,452 |
| **ηн** | 0,860 |  | 1,525 | 0,224 | 0,011 | 0,246 | 11,350 | 283758,197 | 21,777 | 1,519 | 6077,373 | 18232,118 | 60795,848 |
| **l, м** | 175,000 |  | 1,550 | 0,222 | 0,011 | 0,244 | 11,167 | 279181,452 | 22,612 | 1,578 | 6310,360 | 18931,079 | 60808,297 |
| **ξм** | 7,000 |  | 1,575 | 0,220 | 0,011 | 0,242 | 10,990 | 274750,000 | 23,465 | 1,637 | 6548,434 | 19645,303 | 60857,803 |
| **λтр** | 0,015 |  | 1,600 | 0,219 | 0,011 | 0,240 | 10,818 | 270457,031 | 24,337 | 1,698 | 6791,628 | 20374,883 | 60943,438 |
| **Стр, руб/т** | 25000,000 |  | 1,625 | 0,217 | 0,011 | 0,239 | 10,652 | 266296,154 | 25,227 | 1,760 | 7039,971 | 21119,912 | 61064,335 |
| **СE, руб/кВт\*ч** | 3,000 |  | 1,650 | 0,215 | 0,011 | 0,237 | 10,490 | 262261,364 | 26,135 | 1,823 | 7293,494 | 21880,482 | 61219,686 |
| **h, час** | 4000,000 |  | 1,675 | 0,214 | 0,011 | 0,235 | 10,334 | 258347,015 | 27,062 | 1,888 | 7552,227 | 22656,682 | 61408,735 |
| **Ен** | 0,150 |  | 1,700 | 0,212 | 0,011 | 0,233 | 10,182 | 254547,794 | 28,008 | 1,954 | 7816,202 | 23448,605 | 61630,774 |
| **ρст, кг/м3** | 7850,000 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Адрес минимума | N3 |
| **υ, м3/кг** | 0,001 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Значение минимума | 60795,848 |
| **π** | 3,142 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **Δω** | 0,025 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Таким образом, оптимальным вариантом по критерию эффективности - минимуму годовых затрат, является скорость жидкости ωОПТ = 1,525 м/с и dОПТ = 0,224 м (внутренний) и 0,246 м (внешний). Целевая функция затрат принимает при этих параметрах значение 60795,848 руб.. В результате увеличения стоимости электроэнергии до значения 3 руб/кВт\*ч оптимальный диаметр увеличился, поскольку уменьшилась оптимальная скорость течения жидкости.

1. Построить график изменения оптимальной скорости ωОПТ от CЕ.

С увеличением стоимости электроэнергии оптимальная скорость движений жидкостей уменьшается.

**Выводы:**

Таким образом, целевая функция растёт при росте годовых эксплуатационных издержке и капиталовложений.

Годовые эксплутационные издержки зависят от годовой потребляемой энергии, поэтому для снижения общих годовых издержек, необходимо повлиять на этот фактор, уменьшая либо количество часов работы, либо мощность насоса, которая напрямую зависит гидравлического сопротивления, которое будет расти при увеличении скорости движения по трубам. То есть, чем меньше часов работы или мощность насоса, тем меньше будут годовые издержки.

Капиталовложения зависят от массы трубопровода, и если будет расти масса, то будут и увеличиваться и капвложения. Масса трубопровода зависит от внешнего и внутренних диаметров, которые в свою очередь обратно пропорциональны скорости течения. Соответственно, чем больше скорость, тем меньше капиталовложения.

Если коррелировать два этих параметра, можно добиться оптимального эффекта.

При изменении удельных капиталовложений и стоимости электроэнергии также происходит изменение целевой функции.

Рост удельных капиталовложений, как и рост стоимости электроэнергии, провоцирует рост годовых приведённых затрат, поскольку стоимость функционирования повышается.

**Список литературы**

1. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах: учеб. пособие для студентов эконом. спец. вузов. / И.Л. Акулич. – М.: Высшая школа, 1986. – 319 с.
2. Курицкий Б.Я. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0: в примерах / Б.Я. Курицкий. – СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 1997. – 384 с.
3. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции / В.Я. Рыжкин. – М.: Энергоатомиздат, 1987.