

Этюд 16. Расчет потери напора в трубопроводе

В этом этюде будет показано, как можно использовать "облачные" функции для решения несложной, но типичной гидротехнической задачи — задачи о потере напора воды в горизонтальном трубопроводе. Такая задача встает, например, при проектировании трубопровода, подающего техническую (охлаждающую) воду из градирни в конденсатор паровой турбины и возвращающего нагретую воду обратно в градирню.

Потеря напора (давления) имеет место и в паропроводе, подающем водяной пар из котла в турбину. В *этюде 5* (см. рис. 5.1) рассчитали и отобразили на hs - и Ts -диаграммах процесс "доставки" водяного пара от котла к турбине, приняв, что начальное давление равно 24 МПа, а конечное — 10 МПа.

На сайте автора есть страница, где можно рассчитать процесс расширения (дросселирования) водяного пара и отобразить его на hs -диаграмме (рис. 16.1). Если задать значение относительного внутреннего КПД процесса расширения водяного пара равным 100%, то мы получим процесс *идеальной* работы пара в турбине, когда *энтропия пара остается постоянной* ("вертикальное" расширение пара). Если же мы зададим значение относительного внутреннего КПД процесса расширения водяного пара равным нулю, то получим процесс *идеального* дросселирования водяного пара, когда *энтальпия пара остается постоянной* ("горизонтальное" расширение пара). При *реальной* работе пара в турбине значение относительного внутреннего КПД процесса близко к 100%, а при *реальном* дросселировании близко к нулю. Посетитель сайта, показанного на рис. 16.1, по своему усмотрению может менять значение относительного внутреннего КПД процесса и получать нужные кривые расширения пара.

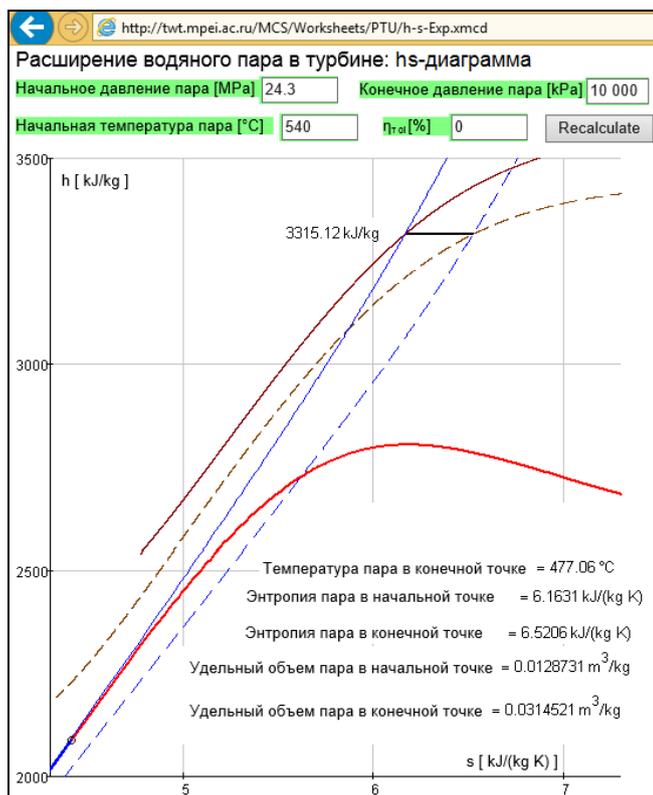


Рис. 16.1. Дросселирование пара на интернетовской *h*-*s*-диаграмме

На рис. 9.9 в *эпюде 9* помещена диаграмма дросселирования влажного пара, по которой можно оценить степень сухости пара в начальной точке, зная начальное давление, давление и температуру в конечной точке.

Как мы уже отмечали ранее, создано множество программ для компьютеров по расчету трубопроводов разной степени сложности и детализации. Эти программы работают по принципу "черного ящика", куда "кладут" массив исходных данных, "закрывают крышку ящика" (нажимают кнопку **Пересчитать**), "открывают крышку" и "вытаскивают из ящика" ответ — параметры проектируемого или эксплуатируемого трубопровода. Но, как уже отмечалось *во введении*, всегда хочется знать, что находится в таком "черном ящике", правильно ли ведутся расчеты. Кроме того, приоткрывать крышку такого "ящика" полезно в целях образования и самообразования — для изучения математических моделей, заложенных в те или иные расчет-

ные программы. Вот мы сейчас и рассмотрим такую частную математическую модель!

Для решения задачи о потере напора в трубопроводе инженер должен вспомнить или найти в справочниках, бумажных или интернетовских (в Web-справочниках) набор соответствующих формул и правила их применения — формуляций. Кроме того, инженеру необходимо знать некоторые свойства воды, в частности, для данной задачи — ее кинематическую вязкость ν . Значения этого параметра воды приводятся в многочисленных различных справочниках в виде таблиц, графиков или эмпирических формул, связывающих вязкость воды с ее температурой. Влияние давления на это свойство воды, как правило, не учитывается. Причем эти данные, полученные из таблиц и формул довольно солидных справочников, могут существенно различаться. Кроме того, инженер при переносе чисел из таблицы в конкретный расчет, как мы уже не раз отмечали, может допустить ошибку, связанную с неправильной интерполяцией и даже с ошибочным набором цифр на клавиатуре компьютере и/или неверной интерпретацией единиц измерения вязкости и множителя при них. Все это усложняет и тормозит расчеты, повышает вероятность ошибок в них.

Динамическая вязкость воды рассчитывается по формуляции, разработанной и утвержденной Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара (IAPWS — www.iapws.org), с которой активно сотрудничает автор этой книги. На основе формуляций IAPWS во всем мире выпускаются справочники с таблицами, хранящими дискретные значения параметров воды и водяного пара в зависимости от температуры и давления. Подобные таблицы публикуются и в нашей стране. Самый свежий такой справочник [1] дополнен сайтом Интернета (<http://twt.mpei.ac.ru/rbtp>), облегчающим и ускоряющим работу со справочником. Одна из страниц этого справочника с адресом <http://twt.mpei.ru/MCS/Worksheets/rbtp/tab9.xmcd> показана на рис. 16.2.

Таблица IX. Динамическая вязкость воды и водяного пара
(из справочника: Александров А.А., Орлов К.А., [Очков В.Ф.](#)
[Теплофизические свойства рабочих веществ](#)
[теплоэнергетики](#) М.: Издательский дом МЭИ, 2009)
Область допустимых значений p и T >>>

T := 16 °C p := 5 atm

digits := 4 Recalculate

$\mu = 1108 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$ Относительная погрешность = 1 %

Рис. 16.2. Интернет-страница с интерактивным расчетом динамической вязкости воды

Зайдя на сайт, показанный на рис. 16.2, можно изменить температуру и/или давление, выбрав нужные единицы измерения этих исходных величин, указать число значащих цифр в ответе, нажать на кнопку **Recalculate** (Пересчитать) и получить не

только затребованное значение динамической вязкости воды или водяного пара, но и значение относительной погрешности данной величины, которая разная в различных областях давления и температуры. Этот расчетный "черный ящик" можно приоткрыть и узнать из данного Web-справочника, по каким формулам рассчитывалась динамическая вязкость воды и/или водяного пара.

В Московском энергетическом институте на кафедре технологии воды и топлива, как мы уже отмечали, создана новая интернет-технология работы со свойствами воды и водяного пара, исключающая ручной перенос данных из бумажного [1] или интернетовского (см. рис. 16.2) справочника.

В справочнике [1] собраны не только интерактивные сетевые расчеты по свойствам воды и/или водяного пара, но и соответствующие запрограммированные функции, которые можно непосредственно использовать в расчетах, задавая, например, не динамическую вязкость воды, а температуру и давление воды. Начало списка таких функций ("облачных" функций — функций, расположенных в "облаках" Интернета) показано на рис. 16.3.



Рис. 16.3. Список "облачных" функций по свойствам воды и водяного пара

В этом списке находится плотность и динамическая вязкость воды, нужные для вычисления потери напора воды в трубопроводе. Для того чтобы функция плотности воды в зависимости от давления и температуры стала доступна (видима, как говорят программисты) в Mathcad-расчете, необходимо знать интернет-адрес этой "облачной" функции — <http://twf.mpei.ac.ru/rbtp/MC-WSP/M15/wspDYNVISCTD.xmcdz>. Для этого достаточно подвести курсор мыши к ссылке на нужную функцию (см. подчеркнутые названия на рис. 16.3), нажать правую кнопку мыши и выбрать команду **Свойства** (Properties). После этого действия на экране дисплея появится окно с интернет-адресом нужной функции (рис. 16.4).

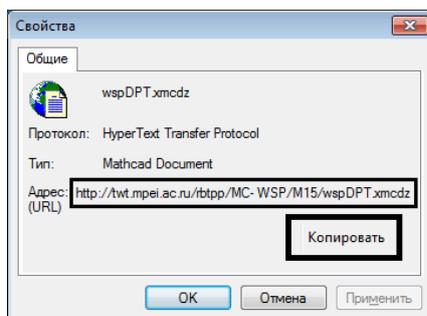


Рис. 16.4. Адрес "облачной" функции "Динамическая вязкость воды и водяного пара"

Этот адрес необходимо скопировать и вставить в диалоговое окно **Вставка ссылки** программы Mathcad, где проводится расчет потери напора воды в трубопроводе или иной расчет, требующий знания плотности воды ρ (рис. 16.5).

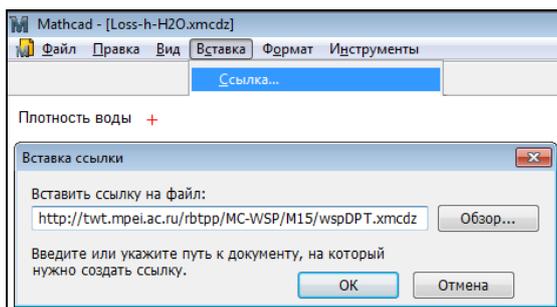
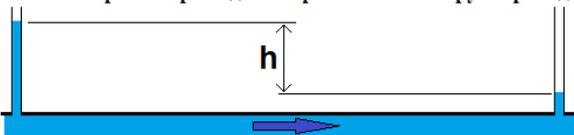


Рис. 16.5. Вставка в расчет ссылки на "облачную" функцию по плотности воды

Таким же образом можно вставить в расчет функцию, возвращающую динамическую вязкость воды μ в зависимости от температуры и давления. Ее интернет-адрес — <http://twf.mpei.ac.ru/rbtpp/MC-WSP/M15/wspDYNVISCTD.xmcdz>.

По значениям плотности воды и ее динамической вязкости в расчете, показанном на рис. 16.6, определяется значение кинематической вязкости ν . Ранее в расчете было введено значение внутреннего диаметра трубы d и рассчитано значение скорости воды в трубе v . По этим трем параметрам (скорость, диаметр и вязкость) рассчитывается очень важный безразмерный критерий течения жидкости в трубе — число Рейнольдса Re , определяющее наряду с шероховатостью внутренней поверхности трубы искомое значение потери напора воды за счет трения о стенку трубы.

Расчет потери напора воды в горизонтальном трубопроводе



Исходные данные

Внутренний диаметр трубы: $d := 50 \text{ mm}$
 Длина трубы: $L := 900 \text{ m}$
 Относительная шероховатость внутренней поверхности трубы: $\Delta := 0.0005$
 Температура воды: $t := 16 \text{ }^\circ\text{C}$
 Расход воды: $Q := 4 \frac{\text{liter}}{\text{s}}$

Решение со ссылками на "облачные" функции из Web-справочников:
<http://twt.mpei.ac.ru/rbtp> и <http://twt.mpei.ac.ru/GDHB/hgd.html>

Сечение трубы: $F := \pi \frac{d^2}{4} = 0.00196 \cdot \text{m}^2$

Скорость воды в трубе: $v := \frac{Q}{F} = 2.04 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Плотность воды Ссылка: <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/MC-WSP/M15/wspDPT.xmcdz>
 $\rho := \text{wspDPT}(5\text{atm}, t) = 999.133 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Динамическая вязкость воды Ссылка: <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp/MC-WSP/M15/wspDYNVISCTD.xmcdz>
 $\mu := \text{wspDYNVISCTD}(t, \rho) = 1.108 \times 10^{-3} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$

Кинематическая вязкость воды $\nu := \frac{\mu}{\rho} = 1.109 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Число Рейнольдса: $Re := \frac{v \cdot d}{\nu} = 91861$

Коэффициент сопротивления трения - функция относительной шероховатости Δ и Re
 Ссылка: <http://twt.mpei.ac.ru/GDHB/La-De-Re-formulas.xmcdz> $\lambda := \lambda_{\text{friction}}(\Delta, Re) = 0.02064$

Потеря напора: $h := \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 78.62 \text{ m}$

Рис. 16.6. Расчет потери напора в трубопроводе

В справочной литературе зависимость относительного безразмерного коэффициента сопротивления от течения жидкости в круглой трубе λ дается либо графиками, либо набором формул. На рис. 16.7 показан фрагмент интернет-страницы с адресом <http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Hydro/La-De-Re.xmcd>, где размещена "живая" номограмма ("ложка Никурадзе"), связывающая рассматриваемый нами коэффициент сопротивления λ с числом Рейнольдса Re и относительной шероховатостью поверхности Δ (отношения средней высоты выступов (шероховатостей) внутренней поверхности трубы к ее внутреннему диаметру).

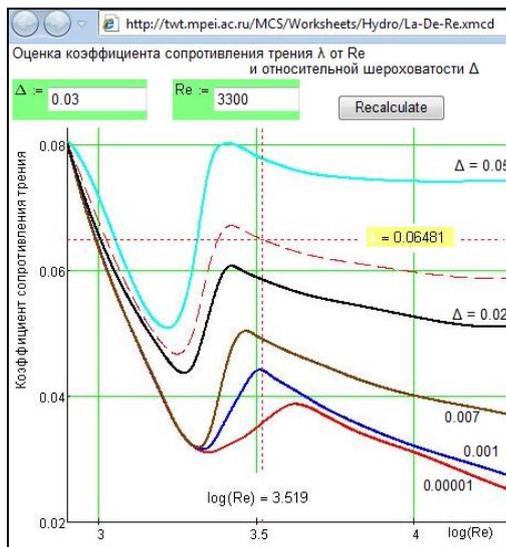


Рис. 16.7. Графическая зависимость относительного коэффициент трения от параметров течения воды в круглой трубе

Посетитель сайта (см. рис. 16.7) может изменить значение Δ и Re , нажать кнопку **Recalculate** и не только получить (считать) нужное число, но и видеть характер этой зависимости в самой "интересной" области — в переходной области от ламинарного течения к турбулентному — области, где... не рекомендуется эксплуатировать трубопроводы. Зоны слева (ламинарное течение жидкости) и справа (повышенная турбулентность) от кривых, показанных на рис. 16.7, обсчитываются по формулам, представленным далее на рис. 16.8. На расчетном портале, где расположены описываемые в книге сайты, есть и справочник по гидрогазодинамике. В этом Web-справочнике хранится и "облачная" функция, возвращающая значение нужного нам коэффициента трения в зависимости от числа Рейнольдса в широком диапазоне и относительной шероховатости внутренней поверхности круглой трубы. Эта функция приведена на рис. 16.8 и вставлена в расчет, показанный на рис. 16.6, с помощью вышеописанного инструмента ссылки на "облачную" функцию.

```

λfriction(Δ, Re) :=
  return  $\frac{64}{Re}$  if Re ≤ 2300
  return NaN if 2300 < Re ≤ 4000
  | "Формула Блазиуса" return if  $4000 < Re \leq \frac{10}{\Delta}$ 
  |  $\frac{0.3164}{Re^{0.25}}$ 
  | "Формула Альтшуля" return if  $\frac{10}{\Delta} < Re < \frac{560}{\Delta}$ 
  |  $0.11 \cdot \left(\Delta + \frac{68}{Re}\right)^{0.25}$ 
  | "Формула Альтшуля" otherwise
  |  $0.11 \cdot \Delta^{0.25}$ 
λfriction(0.0005, 91861) = 0.02064

```

Рис. 16.8. Набор формул по расчету относительного коэффициента трения от параметров течения воды в круглой трубе

В литературе можно найти различные "именные" формулы для расчета коэффициента трения в зависимости от Re и Δ (см. комментарии на рис. 16.8 и таблице на рис. 17.10 в *эпюде 17*). Из этого набора формул брать можно, в принципе, любую, особо не задумываясь об ее точности. Дело в том, что очень грубо оценивается сам исходный параметр — шероховатость трубы. Замерить шероховатость трубы можно только приблизительно. Обычно это делают в процессе гидравлических испытаний труб. В справочной литературе этот важный параметр дается в неких пределах в зависимости от материала труб (металл, пластик, керамика, медь и др.), способа их изготовления (труба сварная, труба цельнотянутая и т. д.) и других особенностей производства. Кроме того, шероховатость внутренней поверхности трубы может меняться при ее эксплуатации или простое из-за коррозионно-эрозионных процессов или за счет отложений в трубах. В принципе, при расчете потери напора нужно вводить в качестве исходных данных не конкретные числовые значения относительной шероховатости Δ , а некие лингвистические константы ("цельнотянутая труба", "сварная труба", "пластиковая труба" и т. д.), по которым методами нечетких множеств оценивают значение Δ в некоем диапазоне, определяющем наряду с другими неопределенностями (с неопределенностью диапазона значений числа Рейнольдса и самих формул для расчета λ на рис. 16.8) ожидаемый диапазон возможного изменения рассчитанного значения потери напора.

В расчете, показанном на рис. 16.6, параметры воды по длине трубы определяются заданной температурой 16 °С и давлением, равным 5 атм. Это довольно-таки грубое приближение, которое мы сейчас попытаемся снять.

Давление воды по длине трубы, конечно, меняется. Как правило, оно уменьшается по ходу течения жидкости, но может и увеличиваться за счет гидростатического давления, если жидкость в трубе подается снизу вверх. Но свойства жидкостей, в

частности воды, слабо зависят от давления. Они сильно зависят от температуры. А как температура и давление жидкости будут меняться по ходу течения воды? Если по трубе будет перекачиваться вода с температурой бóльшей, чем температура окружающей среды, то в расчете необходимо учитывать потерю тепла через стенку трубопровода. Попытка решения такой задачи показана на рис. 16.9 и 16.10.

Исходными данными будут следующие величины: внутренний диаметр трубы d , длина трубы L , толщина стенки трубы Δ , относительная шероховатость внутренней поверхности трубы Δ , температура t и давление p воды на входе в трубу, массовый расход воды Q , теплопроводность материала стенки трубы λ , коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы α_1 и от внешней поверхности трубы в окружающую среду α_2 , а также температура окружающей среды t_{out} .

При расчете труба разбивается на n участков (конечных элементов). Расчет начального (нулевого) участка показан на рис. 16.9.

$$\begin{aligned}
 F &:= \pi \frac{d^2}{4} = 3.142 \cdot \text{cm}^2 & r &:= \frac{d}{2} = 10 \cdot \text{mm} & R &:= r + \Delta t = 15 \cdot \text{mm} \\
 n &:= 1000 & \Delta l &:= \frac{L}{n} = 0.5 \cdot \text{m} & T_0 &:= t = 230 \cdot ^\circ\text{C} & P_0 &:= p = 4.5 \cdot \text{MPa} & L_0 &:= 0 \cdot \text{m} \\
 N_0 &:= \frac{2\pi \cdot \Delta l \cdot (T_0 - t_{out})}{\frac{1}{\alpha_1 r} + \frac{1}{\lambda \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)} + \frac{1}{\alpha_2 R}} \cdot \frac{1}{Q} = 128.76 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}} & \rho_0 &:= \text{wspDPT}(P_0, T_0) = 828.758 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\
 v_0 &:= \frac{Q}{F} \cdot \frac{1}{\rho_0} = 3.2 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} & h_0 &:= \text{wspHPT}(P_0, T_0) = 990.536 \cdot \text{kJ/kg} \\
 \mu_0 &:= \text{wspDYNVISPT}(P_0, T_0) = 1.167 \times 10^{-4} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s} & Re_0 &:= \frac{\rho_0 \cdot v_0 \cdot d}{\mu_0} = 4.548 \times 10^5 \\
 \Delta H_0 &:= \lambda_{\text{friction}}(\Delta, Re_0) \cdot \frac{\Delta l}{d} \cdot \frac{(v_0)^2}{2g} + \text{if}(\text{Var} = 1, 0 \cdot \text{m}, \text{if}(\text{Var} = 2, -\Delta l, \Delta l)) = 229.3 \cdot \text{mm} \\
 \Delta P_0 &:= \Delta H_0 \cdot g \cdot \rho_0 = 1.864 \cdot \text{kPa}
 \end{aligned}$$

Рис. 16.9. Расчет начального участка трубопровода

На этом рисунке последовательно вычисляются следующие величины: площадь внутреннего сечения трубы F , ее внутренний r и наружный R радиусы. Затем задается число конечных элементов разбиения трубы n . Во время отладки программы это число можно задавать небольшим (10–100), а в готовой программе увеличивать до 1000–10 000.

После задания значения n высчитывается значение длины элементарного участка трубы Δl . Затем заполняются начальные (нулевые) элементы *векторов*, хранящих следующие величины на данных элементарных участках: T — температура воды, P — давление воды, N — удельная потеря тепла (энтальпии), ρ — плотность воды, v — скорость воды, h — удельная энтальпия воды, μ — динамическая вязкость воды, Re — число Рейнольдса, ΔH — потеря напора и ΔP — потеря давления.

В формуле, определяющей потерю напора Δn , фигурирует слагаемое с функцией if и дополнительным параметром var — вариант. А "вариантов" тут три:

- $var = 1$: горизонтальный трубопровод;
- $var = 2$: вертикальный трубопровод с подачей воды снизу вверх;
- $var = 3$: вертикальный трубопровод с подачей воды сверху вниз.

Тут рассмотрены некоторые крайние случаи. Реальный трубопровод может иметь различные участки, повторяющие рельеф местности и/или геометрию прокладки трубопровода на различных технологических установках.

Наиболее сложной является формула для определения удельной потери тепла (эн-тальпии) воды n . Это стандартная формула, полученная при решении задачи стационарной теплопроводности бесконечной цилиндрической трубки при отсутствии внутренних источников тепла. Краевыми условиями этой задачи будут значения коэффициента теплоотдачи на внутренней α_1 и внешней α_2 поверхностях трубы. Определение значений α_1 и α_2 — это отдельная не менее сложная задача. Пока мы будем задавать эти значения константами. Но при развитии расчета в него можно будет вставить формулы для определения значений α_1 и α_2 в зависимости от режима течения воды в трубе и других факторов.

На рис. 16.10 показаны операторы Mathcad, заполняющие остальные элементы пересчитанных векторов.

```

M := for i ∈ 1..n
    hi ← hi-1 - Ni-1
    Pi ← Pi-1 - ΔPi-1
    Ti ← wspTPH(Pi, hi)
    Ni ←  $\frac{2\pi \cdot \Delta l \cdot (T_i - t_{out})}{\frac{1}{\alpha \cdot r} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) + \frac{1}{\alpha \cdot 2 \cdot R}} \cdot \frac{1}{Q}$ 
    ρi ← wspDPT(Pi, Ti)
    vi ←  $\frac{Q}{F} \cdot \frac{1}{\rho_i}$ 
    μi ← wspDYNVISPT(Pi, Ti)
    Rei ←  $\frac{\rho_i \cdot v_i \cdot d}{\mu_i}$ 
    ΔHi ← λfriction(Δ, Rei) ·  $\frac{\Delta l}{d} \cdot \frac{(v_i)^2}{2g} + \text{if}(\text{Var} = 1, 0m, \text{if}(\text{Var} = 2, -\Delta l, \Delta l))$ 
    ΔPi ← ΔHi · g · ρi
    Li ← Li-1 + Δl
    augment( $\begin{pmatrix} P & T & L \\ P_a & K & m \end{pmatrix}$ )
P := M(0) · Pa   T := M(1) · K   L := M(2) · m

```

Рис. 16.10. Поэлементный расчет трубопровода

На рис. 16.10 представлен цикл перебора всех участков трубопровода, начиная с первого. Нулевой (начальный) участок трубопровода был рассчитан раньше (см. рис. 16.9) вне цикла, в том числе и в целях отладки расчета.

В цикле, показанном на рис. 16.10, рассчитывается очередной *i*-й участок трубопровода с использованием данных по предыдущему (*i* - 1) участку. В матрицу **M** заносятся три столбца: данные по изменению давления **P** и температуры **T** воды, а также вектор **L**, хранящий значения расстояний от начала трубы до *i*-й точки. Эти данные при выводе (см. последний оператор в программе на рис. 16.10 с функцией `augment`¹) приходится сначала лишать размерностей давления, температуры и длины, а затем возвращать их во вновь формируемых вне программы векторах **P**, **T** и **L** (см. три последних оператора на рис. 16.10). Это связано, как мы уже не раз отметили, с главным недостатком Mathcad 15 (а в среде этого пакета создавался расчет, показанный на рис. 16.9 и 16.10) — невозможностью хранения в массивах "разно-размерных" данных.

¹ Эта встроенная в Mathcad функция соединяет отдельные векторы в матрицу, где эти векторы будут столбцами.

На рис. 16.11–16.13 показаны графики изменения температуры и давления в нашем трубопроводе, расположенном горизонтально (см. рис. 16.11), вертикально с подачей воды снизу вверх (см. рис. 16.12) и сверху вниз (см. рис. 16.13).

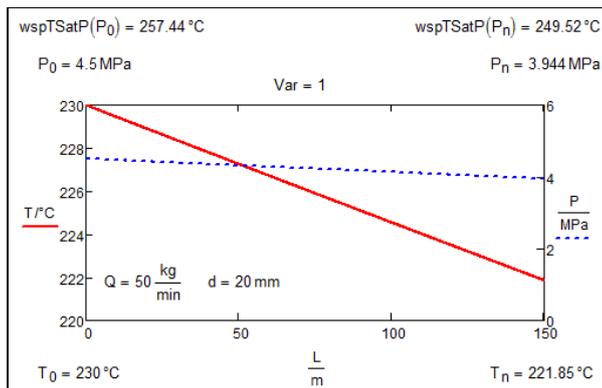


Рис. 16.11. График изменения температуры и давления воды в горизонтальном трубопроводе

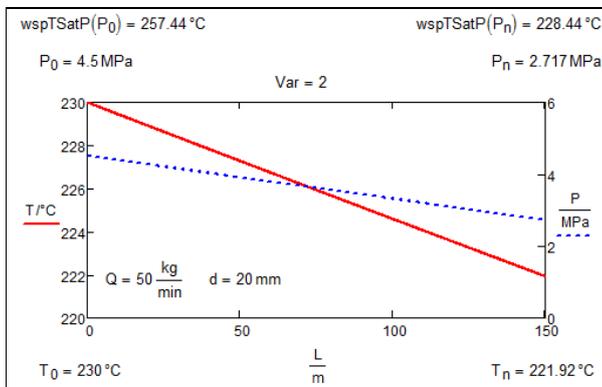


Рис. 16.12. График изменения температуры и давления воды в вертикальном трубопроводе (насос внизу)

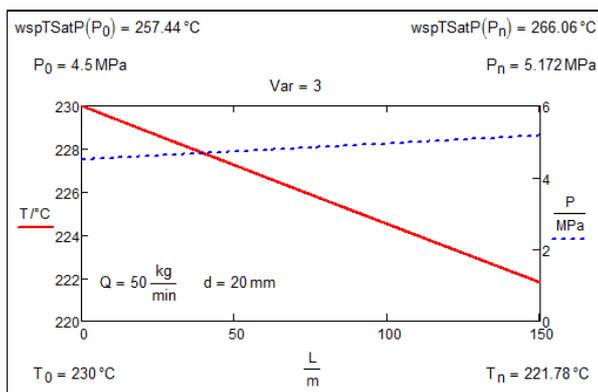


Рис. 16.13. График изменения температуры и давления воды в вертикальном трубопроводе (насос вверх)

На графиках показаны также рассчитанные с помощью функции `wspTSatP` значения температуры насыщения воды при начальном и конечном давлении в трубопроводе. И это неспроста. Дело в том, что расчет, представленный на рис. 16.9–16.13, — это попытка смоделировать процесс подачи горячей воды под давлением по резиновому шлангу для пожаротушения. На конце шланга расположена форсунка, через которую вода, превратившись в облако влажного пара, который тушит огонь.

При подаче такой воды важно, чтобы она не закипела раньше времени внутри резиновой трубки. Здесь особо опасен случай подачи воды сверху вниз. Если при двух первых случаях (горизонтальный трубопровод и вертикальный трубопровод с подачей воды снизу вверх) потеря давления может быть не так значительна, то в третьем случае потеря гидростатического напора может привести к резкой потере давления и вскипанию воды в резиновой трубке.

Онлайн расчет параметров воды в трубке можно провести на сайте <http://twm.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Hydro/TubeMChS.xmcd>.

Можно также в режиме онлайн оценить изменение температуры внутри стенки трубы. Для этого достаточно зайти на сайт по адресу <http://twm.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Thermal/Heat-Flow-1radius.xmcd>, ввести нужные исходные данные и получить ответ (рис. 16.14).

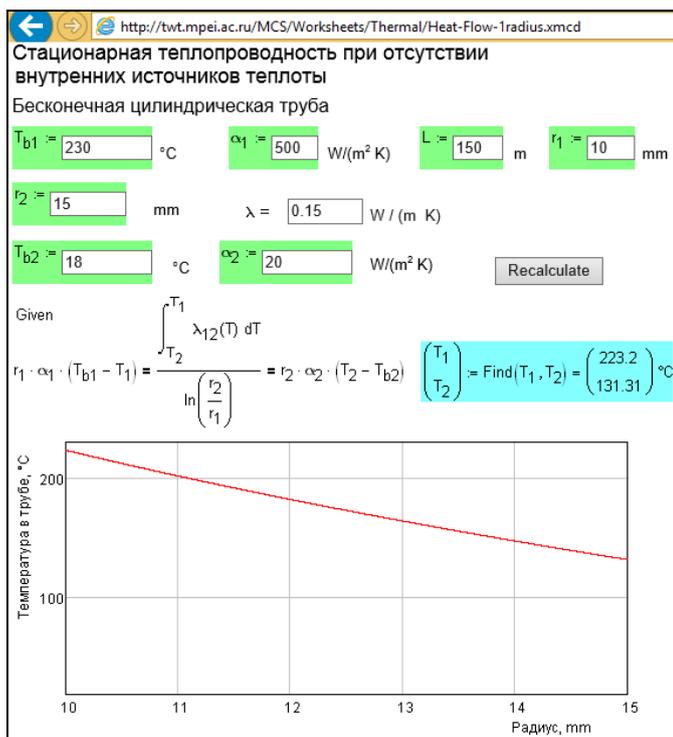


Рис. 16.14. Температурное поле в цилиндрической стенке

Формулу, являющуюся ключевой при расчете потери напора (она заключена в рамку на рис. 16.6), всегда хочется упростить, т. е. "загнать", например, константы 2 и g (ускорение свободного парения) из знаменателя в коэффициент сопротивления λ . Но этого нельзя делать по ряду причин. Во-первых, ускорение свободного падения g ($9,81 \text{ m/s}^2$) — строго говоря, не константа, а функция других величин, в первую очередь, высоты над уровнем моря и географической широты местности. Если в Mathcad-документе сделать ссылку на "облачную" функцию по адресу <http://twm.mpei.ac.ru/TTHB/g-h-psi.xmcdz>, то в среде Mathcad константа g превратится в функцию $g(h, \varphi)$, где h — это высота над уровнем моря, а φ — географическая широта местности (0° — экватор, 90° — полюса Земли). Кроме того, нужно помнить, что когда-то в будущем трубопроводы могут проектироваться и строиться на... Луне или на Марсе, где значение g совсем не 9.81 m/s^2 ! А вот интересный вопрос: применима ли наша формула для определения потери напора в водопроводе или топливопроводе на космической станции, где $g = 0$? Кстати говоря, во многих

расчетах для упрощения счета и с учетом того факта, что расчеты ведутся довольно грубо, значение ϱ принимается равным 10 m/s^2 , а плотность воды — 1000 kg/m^3 . По найденной нами на рис. 16.2 потере напора можно также довольно грубо оценить перепад давления в атмосферах, необходимого для прокачки воды по трубе. Для этого значение напора делится на десять.

Да, константу ϱ нельзя убрать из формулы расчета потери напора в трубопроводе и перенести ее в коэффициент λ . А как быть с двойкой в знаменателе этой формулы? Ее тоже нельзя "загнать" в коэффициент сопротивления λ , но уже по другим причинам. Глядя на двойку и квадрат скорости в формуле потери напора, можно вспомнить старый анекдот. Студент спешил на экзамен по физике, задумался и... врезался в столб. "Хорошо, что пополам!" — воскликнул студент. "Что пополам?" — спросил его товарищ. — "Эм ве квадрат пополам!", — ответил студент.

Формула потери напора отображает фундаментальный закон физики, связывающий изменение кинетической энергии потока жидкости вследствие трения о стенки трубопровода и перевод этой энергии в менее ценную — в тепловую. В горизонтальном трубопроводе (наша упрощенная задача) потенциальная энергия не меняется, а кинетическая "эм ве квадрат пополам" — меняется. Так что двойка в нашей формуле потери напора вполне уместна: без нее будет плохо пониматься "физика" задачи.

В связи с нашими вышеприведенными рассуждениями о силе тяжести и о двойке в формуле потери напора воды вспоминается интересный теоретический вопрос, касающийся рек — "водопроводов", снабжающих человечество помимо прочего и электроэнергией. Для чего на реке строится плотина у гидроэлектростанции? Подавляющее большинство даже вполне грамотных инженеров и специалистов ответят примерно так. На реке у ГЭС плотина строится для того, чтобы поднять уровень воды в реке и тем самым создать напор воды перед гидравлической турбиной, вырабатывающей электроэнергию. Но плотина — это сугубо пассивное сооружение, это не насос, повышающий напор воды! Наша простенькая задача, которую мы разобрали в этой книге, поможет нам правильно ответить на этот вопрос. Плотина на ГЭС строится для того, чтобы... снизить среднюю скорость течения воды в реке за счет увеличения сечения русла реки. На равнинных реках плотины строят невысокие, но длинные, а на горных реках — высокие и неширокие. За счет этого резко уменьшается средняя скорость течения воды в реке, и, следовательно, снижаются потери на трение воды о берега и дно реки. Это и является источником энергии для турбин ГЭС, вырабатывающей электроэнергию.

Есть и другой способ получения электроэнергии от реки, который в настоящее время все чаще и чаще используется, особенно на горных реках и ручьях без сооружения дорогостоящих и опасных в сейсмических зонах плотин. Параллельно руслу реки прокладывается трубопровод, в нижнем конце которого устанавливается гидротурбина. Вода или часть воды спускается вниз не по неровному руслу реки, а по гладкой трубе. За счет этого потенциальная энергия воды (которая, подчеркиваем еще раз, не меняется после возведения плотины), определяемая перепадом высот, не так интенсивно рассеивается за счет трения и преобразуется в электроэнергию, достаточную для обеспечения светом небольшого поселка. Такие мини- и

микроГЭС широко распространены, например, в Норвегии. Кстати говоря, подобные "электростанции" иногда "строятся" и на концах различных трубопроводов. Конкретный пример: город снабжается природным газом по газопроводу высокого давления. Бытовым же потребителям газ нужен под очень низким избыточным давлением, иначе возникнут проблемы с утечкой газа в домах. Лишнее давление можно убрать дросселированием газа с помощью редукторов с потерей этой энергии потока газа. А можно выбрать другое — энергосберегающее — решение. Можно на конце такого газопровода установить турбогенератор, преобразующий избыточное давление газа в электричество. Такими мини-электростанциями оборудованы некоторые газовые турбины крупных электростанций. Автор давно видел интересное гидротехническое устройство в Литве. В одном овраге стекала вода с перепадом высот 2–3 м. Эти высоты были соединены трубой, на нижнем конце которой стоял поршневой насос с поршневым же приводом. Этот насос подавал воду в дом, расположенный намного выше верхнего конца этой трубы. Такие гидротехнические устройства (насосы с гидроприводом), оборудованные двумя поршнями разного диаметра, расположенными на коромысле с разными плечами, в свое время широко использовались для водоснабжения в Швейцарии, богатой реками и ручьями с большим перепадом высот.

Можно упомянуть и еще один экзотический, но вполне реализуемый способ получения энергии из реки — потока *пресной* воды, впадающей в *соленые* моря и океаны. Есть много методов получения пресной воды из морской: дистилляция, вымораживание, ионный обмен, обратный осмос, электродиализ... В электродиализных аппаратах обессоливания поступают морская (соленая) вода и электроэнергия, а выходит пресная (обессоленная вода) и концентрат. Но эти аппараты *обратимые*. Если в него подавать раздельно соленую воду и пресную воду, то такой аппарат будет вырабатывать электричество за счет смешения вод разной солености. Такие электродиализные электрические станции вполне уместны в устьях больших рек, впадающих в моря и океаны. В настоящее время существуют подобные экспериментальные и полупромышленные установки и прорабатывается вопрос строительства таких реальных электростанций.

Аппарат обратного осмоса также представляет собой устройство, куда подаются соленая вода и электричество и из которого выходят два потока воды: обессоленная вода (пермеат) и концентрат. Но принципы действия электродиализных и обратно-осмотических аппаратов обессоливания различны. В электродиализном аппарате электрический ток непосредственно подается на специальные электроды, заставляющие ионы (катионы и анионы солевых примесей воды) двигаться, разделяться посредством специальных мембран и, в конце концов, удаляться из воды. В аппарате же обратного осмоса электричество тратится на привод насосов, поднимающих давление соленой воды до значения (до *осмотического* давления и выше), достаточного для того, чтобы молекулы воды смогли пройти ("протиснуться") через мельчайшие поры специальных мембран. При этом гидратированные катионы и анионы остаются в соленой воде и удаляются из аппарата с продуваемым концентратом. Аппарат обратного осмоса тоже в принципе можно заставить вырабатывать электричество, подавая в него два потока воды с различным содержанием. Но

тут не будет прямой выработки электроэнергии как в электродиализном аппарате. В *обратно обратно* осмотической электростанции, т. е. просто в осмотической электростанции, энергию напора воды (осмотическое давление) придется преобразовывать в электричество с помощью, например, уже упомянутых гидротурбин. Из-за этого строительство таких электростанций пока не рассматривается.

В настоящее время водоподготовки тепловых и атомных электростанций России модернизируются. В частности, осветлители для известкования и коагуляции, а также установки ионного обмена заменяются мембранными установками ультрафильтрации и обратного осмоса. При этом резко снижаются потребление реагентов на водоподготовку (известки, коагулянтов, кислоты, щелочи) и объем сточных вод. Но увеличивается расход электроэнергии на привод насосов, проталкивающих воду через мембраны. В связи с этим в целях экономии можно рассмотреть вопрос о приводе таких насосов не от электродвигателя, а от небольшой паровой турбины. Так, например, работает насос, подающий питательную воду в котлы тепловой электростанции.

Добавлено примечание ([P1]): Два раза - это правильно?

Литература

1. Александров А. А., Орлов К. А., Очков В. Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: интернет-справочник. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — 224 с. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/rbtpp>.
2. Очков В. Ф., Орлов К. А., Френкель М. Л. и др. "Облачный" сервис по свойствам рабочих веществ для теплотехнических расчетов // Теплоэнергетика. — 2012. — № 7. — С. 79–86. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Web-function-Power.pdf>.
3. Очков В. Ф., Яньков С. Г. Эволюция техники инженерных расчетов // Труды Международной научно-методической конференции "Информатизация инженерного образования", 10–11 апреля 2012 г. — М.: Издательский дом МЭИ. URL: http://inforino2012.mpei.ru/App_Text/proc.pdf.
4. Очков В. Ф., Орлов К. А., Чжо Ко Ко и др. "Облачные" функции для инженерных расчетов водоснабжения // Водоснабжение и канализация. — 2012. — № 9, 10. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/GDHB/CloudFunction.pdf>.