

Термодинамические мысли при взгляде на десятирублевую банкноту

Во время поездки в Красноярск для чтения лекций в местном учебном комбинате энергетиков второму лектору курса Инженерные расчеты посчастливилось посетить знаменитую Красноярскую ГЭС, которая попала на одну из банкнот Банка России (рис. 1).



Рис. 1 Реверс десятирублёвой банкноты

Сейчас этот «червонец», увы, постепенно выходит из оборота¹. Его вытесняют монеты того же достоинства, так как изготовление таких банкнот становится дороже самой банкноты. Такая «экономика» постепенно подбирается и к пятидесятирублевой бумажке. Виной тому и инфляция, и некое суеверие. Считается, что банковская система успешной страны должна базироваться на семи банкнотах. В СССР были в ходу рубль, трешка, пятерка, уже упомянутый нами червонец, четвертной (25 рублей), «полтинник» (50 рублей) и сотня. В Европе ходят 5, 10, 20, 50, 100, 200 и 500 евро, а в США – 1, 2, 5, 10, 20, 50 и 100 долларов. Правда, два доллара можно встретить очень редко. Почему? Называют разные причины. Одна из них такая. Таксисты Нью-Йорка и других городов США очень суеверный народ. Они считают (считали раньше), что если в качестве первых чаевых (а они обязательны в Америке) дадут двухдолларовую бумажку, то рабочий день окажется неудачным. В современной России в ходу 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 и 5000 рублей. А 5 и 10 рублей «бумажкой» в этой «великолепной семерке» оказались лишними. Но со временем все банкноты и монеты окажутся лишними, что связано с развитием безналичных расчетов и появлением криптовалют...

Гидротехнические сооружения – мосты изображены и на евро. Мосты также можно увидеть и на российских двух- и пятирублевых купюрах. Плотины многих гидроэлектростанций заодно выполняют функцию мостов. Если, например, ехать из Волгограда в Волжский филиал МЭИ в городе Волжском, то нужно будет проехать по

¹ В Сальвадоре с 1977 по 2004 год была в ходу банкнота в 1 колон с изображением местной арочно-гравитационной плотины ГЭС.

гребню плотины Волжской ГЭС. Волжский, Волжский, Волжский... Тут сразу возникают ассоциации с каскадом Волжских ГЭС. Да и вообще, о ГЭС стали вспоминать все чаще и чаще в связи с проблемой изменения климата. Но не в отрицательном, как раньше, а положительном аспекте. ГЭС в отличие от ТЭС на органическом топливе не выбрасывают в атмосферу углекислый газ. Наоборот – водохранилища ГЭС поглощают углекислоту атмосферы.

Но вернемся к тому, что нарисовано десятирублевой купюрой – к рисунку 1.

Когда автор со своими коллегами из Красноярского учебного центра энергетиков подъезжал на машине к плотине ГЭС, то он вытащил из своего бумажника затесавшуюся там десятку и заслонил ею открывающийся вид электростанцию. Затем банкноту автор постепенно опускал, открывая прекрасную панораму плотины... Автор повидал на Свете много врезавшихся в память архитектурных и инженерных чудес. Красноярская ГЭС – одно из таких чудес.

Мы заехали почти на гребень плотины – на смотровую площадку, минуя ещё одно уникальное гидротехническое сооружение – судоподъемник.

И вот тут-то на смотровой площадке возник вопрос, вернее, целая дискуссия о том, а для чего, собственно, на реках строят плотины? За счет чего ГЭС вырабатывает электроэнергию? Вопрос вполне законный, если учесть тот факт, что до 90% стоимости всей гидростанции – это стоимость сооружения самой плотины. Плюс побочные немалые расходы, связанные с расчисткой будущего ложа водохранилища, переносом поселков и целых городов на «сухое место», изъятием из оборота сельскохозяйственных земель, нарушением миграции рыбы, строительством судоподъемников, шлюзов и прочее, и прочее². Автор в свои детские и юношеские годы смотрел в кинотеатрах перед показом фильмов кинохронику, где мощные самосвалы сбрасывали бетонные тетраэдры и камни в русло Енисея – рис. 2.

² Возник и другой вполне закономерный вопрос, связанный больше с политикой, а не с энергетикой и экономикой. А как такая крупная ГЭС, строящаяся на народные деньги как Всесоюзная комсомольская стройка, оказалась в частных руках!? Тут отвечают примерно так – в частных руках ГЭС эксплуатируется намного лучше. Но крупная авария на Саяно-Шушенской ГЭС, заставляет усомниться в этом утверждении. Если говорить не о ГЭС, а сырьевых богатствах страны, то вспоминается такая печальная шутка: «Комсомольцы «отжали» нефть у народа, затем силовики «отжали» нефть у комсомольцев, а теперь комсомольцы через суды пытаются «отжать» у того же народа компенсацию за «отжатую» силовиками нефть!».



Рис. 2 Покорение Енисея

Новости со строительства крупнейшей в мире по тем временам ГЭС были во всех газетах, лились из каждого радиоприемника и телевизора. Показывали, например, как люди с радостью переезжают из старых частных домов, расположенных в местах будущего затопления, в «прекрасные» пятиэтажки-хрущевки – в дома-человейники, как сейчас принято говорить в связи с реновацией.

Небольшое лирическое отступление.

Фото на рис. 2 заставляет вспомнить сцену из пьесы Виктора Розова «В поисках радости». Её экранизация с прекрасной игрой молодого Олега Табакова называется «Шумный день».

«Леночка. Мама, Федя действительно сейчас имеет много дополнительной работы, но нам надо купить и то, и другое, и третье... Мне самой его жаль, но это временно – когда мы заведем все...»

Таня (Леночке). Ты никогда не заведешь все.

Леночка. Почему это?

Таня. Потому что ты – прорва!»

При перекрытии рек также нередко образуются прорвы, которые приходится заделывать в спешном порядке. «Старый муж, грозный муж» Катерины Измайловой из повести Лескова «Леди Макбет Мценского уезда» на грех оставил её одну в доме – уехал ликвидировать прорву на мельничной плотине. Мы знаем, чем это кончилось...

Но люди на рисунке 2 не «затыкают прорву» – они покоряют Енисей! Хотя мысль о «прорве» здесь тоже возникает. И вот почему.

Современное общество – общество потребления представляет из себя некую огромную прорву мирового масштаба. Многие думающие люди понимают, что мы идем к катастрофе и ничего не можем с собой поделать. Силы природы или божественные силы (кто как для себя считает) вмешались в этот процесс – подкинули нам пандемию, перегрев планеты вследствие парникового эффекта, безудержную гонку вооружений, балансирующую на грани тотальной войны на уничтожение, и прочие «казни египетские» в надежде на то, что человечество наконец-то одумается и перестанет, к примеру, оценивать успех той или иной страны по показателю роста ВВП. Разного рода «саммиты», призванные затормозить эти нежелательные процессы, можно уподобить ритуальным танцам, молебнам, какими древние и не очень древние люди пытались и пытаются вызвать дождь или наоборот прекратить проливные дожди.

Но вернемся к нашему частному вопросу о том, для чего же на реке строят плотину для ГЭС.

Подавляющее большинство людей, людей с высшим техническим и даже с высшим гидротехническим образованием на этот вопрос сразу и не особо думая дают примерно такой простой ответ. Плотина на реке строится для того, чтобы создать напор воды перед гидроагрегатами ГЭС. За счет этого напора ротор турбины вращается и передает механическую энергию электрогенератору, который и вырабатывает электрический ток. Так или иначе ключевыми словам в ответе будут слова «напор воды». Проверьте себя, читатель! Как вы лично ответите на этот вопрос?

Некоторые люди не сразу отвечают на вопрос о плотине ГЭС, чувствуя в нём некий подвох. Но после повторных просьб отвечают примерно так, как описано выше, высказывая при этом некое удивление – кто, мол, не знает ответа на такой «детский» вопрос.

Но плотина – это сугубо пассивное сооружение и оно никак не может «создавать напор». Напор воды может создать только насос, который потребляет энергию. Плотина же никакой энергии не потребляет. Гидроагрегат, работающий в тандеме с плотиной, может создавать напор и качать воду снизу вверх. Так работают гидроаккумулирующие электростанции, попеременно то вырабатывая, то потребляя электроэнергию. Сейчас, кстати, в тренде энергосбережения некоторые дома то потребляют, то вырабатывают электроэнергию. В таких домах, например, сжигают газ для отопления дома и заодно вырабатывают электроэнергию (некое подобие мини-ТЭЦ с установкой OCR – с органическим циклом Ренкина), излишки которой подаются в сеть. Появилось даже такое понятие – просьюмер: физическое лицо, которое не только потребляет электричество или тепло (консьюмер), но и выдает энергию в сеть. Некоторые установки ORC в качестве органического рабочего тела и теплоносителя имеют этиловый спирт – см. главу 15.

Правильный с точки зрения термодинамики ответ на поставленный вопрос о плотине ГЭС таков. Плотина сооружается для того, чтобы... снизить среднюю скорость течения воды в реке. За счет этого уменьшаются потери на трение воды о дно реки и о её берега, на

образование вихрей в самом потоке воды³. Эти-то уменьшенные плотиной потери энергии и преобразуются в гидроагрегате (гидротурбина плюс электрогенератор) в электроэнергию. Средняя скорость воды в реке резко падает из-за того, что сечение русла существенно увеличивается после строительства плотины и заполнения водой водохранилища. Кстати, уменьшить потери на трение и получить тем самым электроэнергию можно и без строительства плотины, и об этом будет рассказано ниже.

Многих таков ответ сильно удивляет. Некоторые считают, что над ними просто подшучивают. Другие полагают, что вы в школе или вузе плохо учили физику. Это отчасти случилось и на смотровой площадке Красноярской ГЭС. Автору пришлось на листке бумаги примерно такую картинку (рис. 3) и дать следующие пояснения.

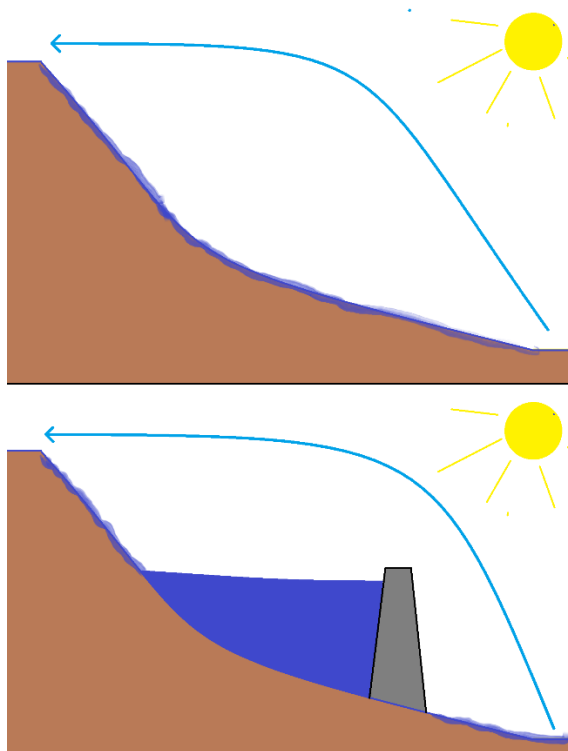


Рис. 3 Круговорот воды в природе и ГЭС

Вода за счет энергии Солнца испаряется с поверхности Земли и в виде дождя и снега выпадает в долинах, на возвышенностях и в горах, а затем по рекам стекает вниз⁴. Часть воды просачивается в землю и через ключи попадает в реки и озера. Потом вода снова испаряется и поднимается вверх. Подобные картинки (рис. 3) можно увидеть в школьных учебниках естествознания с пояснением, что это круговорот воды в природе.

Потенциальная энергия поднятой вверх воды почти вся тратится на её трение о дно реки

³ Считается, что можно бесконечно смотреть на три вещи: горящий огонь, бегущую воду и на то, как работает другой человек. Да, приятно стоять на мосту, перекинутом через реку, и любоваться замысловатыми кругами, которые выделяет бегущая вода. На горных реках эти круги превращаются в шумные брызжащие вихри. В стоячих водах запруд и водохранилищ таких кругов не увидишь: вода бережет свою энергию, чтобы отдать её мельнице или турбине ГЭС. Тепломассообменщики сразу вспоминают о ламинарном и турбулентном течении жидкостей (см. рис. 5), газов и... о самой жизни.

⁴ Много воды «застревает» в горах в виде ледников. Изменение климата, связанное с парниковым эффектом, который упоминается в этой книге, может привести к активному таянию ледников.

и об её берега. Если б не было трения, то вода разгонялась бы до невероятно высоких скоростей, снося все на своем пути. А так из-за трения о русло скорость воды в устье реки оказывается вполне нормальной⁵.

На реке построили плотину. Что в ней изменилось после выхода на стабильный режим – после заполнения водохранилища? Расход воды после заполнения водохранилища вышел на «доплотинный» уровень! Скорость воды в устье почти не изменилась. Но существенно уменьшилась средняя скорость воды в реке и, следовательно, потери на трение воды о русло. Вот эти-то не случившиеся потери и собирает турбина ГЭС, преобразуя их в электроэнергию! Она, повторяем, может это делать и без плотины, о чем будет сказано ниже.

Отчего зависит потеря напора воды от трения в открытой реке или закрытой трубе? В основном от скорости воды и от шероховатости поверхности соприкосновения воды с дном реки или с внутренней стенкой трубы. Куда переходят эти потери? Они идут на нагрев воды и трубы (диссипация ценной механической энергии первого рода – переход её в менее ценную энергию второго рода, в теплоту).

Формулы, по которым можно рассчитать потерю напора Δh и перепад давления Δp в прямой трубе круглого сечения⁶, довольно просты – см. рис. 4. В формулах такие переменные: L – длина трубы, d – её диаметр, v – скорость жидкости или газа, g_e – ускорение свободного падения (у поверхности Земли) и ρ – плотность жидкости или газа. К потере напора за счет трения нужно ещё добавить значение перепада высот на концах трубы. Главная сложность здесь в расчете коэффициента трения λ_f , который в основном зависит от двух безразмерных величин – от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости внутренней поверхности трубы Δ (отношение средней высоты шероховатостей к диаметру трубы).

$$\Delta h := \lambda_f (\Delta, Re) \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 g_e}$$

$$\Delta p := \Delta h \cdot \rho g_e$$

Рис. 4 Формулы для расчета потери давления в трубе

⁵ Есть бесплотинные мини-ГЭС в виде неподвижной баржи с водяным колесом и электрогенератором, вырабатывающим электроэнергию за счет кинетической энергии протекающей воды. Но вклад таких ГЭС в мировой баланс электроэнергетики ничтожно мал.

⁶ Когда-то давно в газете «Поиск», в её первоапрельском номере появилась статья о том, что трубы не круглого, а квадратного сечения имеют меньшее гидравлическое сопротивление. На перекачку по квадратным трубам такого же количества жидкости или газа требуется намного меньше энергии. Все бы ничего (первое апреля есть первое апреля), но через некоторое время в редакцию газеты пришло письмо от одного трубопрокатного завода с просьбой дать координаты ученых, какие провели подобные исследования. Завод, мол, готов начать производство таких «энергосберегающих» труб. Кстати, трубы с почти квадратным сечением широко используются в строительстве в качестве несущих конструкций. Из таких труб мы строим, например, заборы на дачах.

Если читатель откроет сайт по адресу <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Hydro/La-De-Re.xmcd>, то он выйдет на авторский цифровой двойник так называемой ложки Никурадзе – на семейство кривых, напоминающих ложки (столовый набор ложек) и отображающих зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса и относительной шероховатости (рис. 5). Меня исходные данные (значения Re и Δ) и нажимая на кнопку Recalculate, можно получить новый ответ – значение коэффициента трения, фигурирующий в первой формуле на рис. 4.

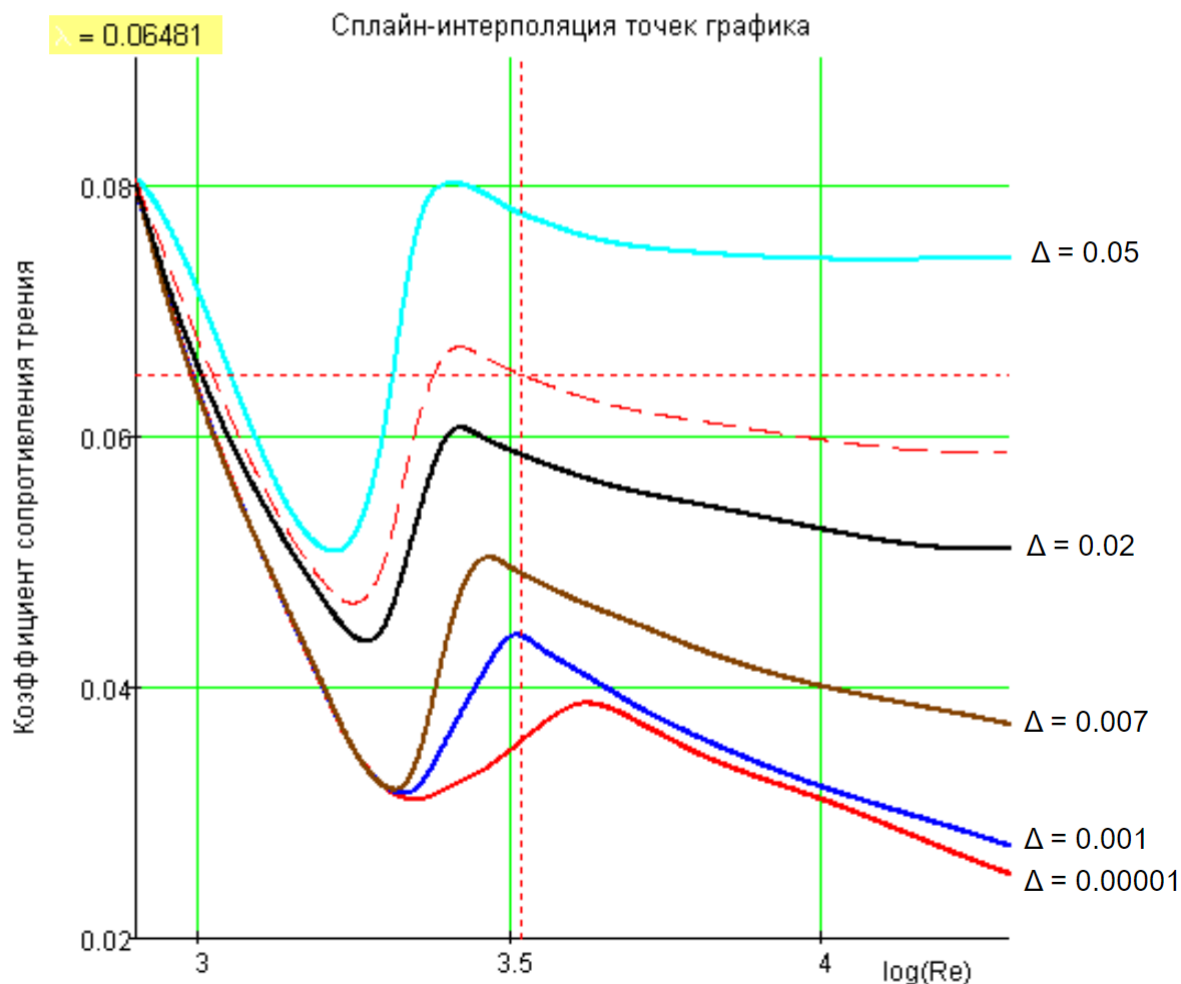
Характерный изящный изгиб кривых на рис. 5 связан с тем, что при росте числа Рейнольдса меняется режим течения жидкости от ламинарного (где шероховатость почти не влияет на трение) до турбулентного, минуя переходный, нестабильный режим. При ламинарном течении без вихрей слои жидкости или газа перемещаются параллельно друг другу, и у внутренней поверхности образуется некая смазывающая пленка, нивелирующая вредное действие шероховатостей. Поэтому-то при этом режиме течения шероховатость поверхности почти не влияет на коэффициент трения. Число (критерий) Рейнольдса, напомним, – это произведение диаметра трубы на среднюю по сечению скорость жидкости или газа, деленное на так называемую кинематическую вязкость жидкости или газа. Кинематическая вязкость – это обычная («динамическая») вязкость, деленная на плотность жидкости или газа.

Evaluation of the resistance coefficient of friction λ as function of Re and relative roughness Δ
 Оценка коэффициента сопротивления трения λ от Re и относительной шероховатости Δ

$\Delta :=$ $Re :=$ (Nikuradse Plot график Никурадзе >>>) Recalculate

Origin Plot >>>

$\log(Re) = 3.519$



Что такое шероховатость >>>

Что такое Re (число Рейнольдса) >>>

Рис. 5 Цифровой интернет-двойник «ложки Никурадзе»

Первая формула на рис. 4 показывает, что коэффициент трения воды о стенку трубы зависит от скорости в квадрате. Но это не совсем так, если учесть, что скорость фигурирует и в числе Рейнольдса, и в зависимостях, показанных на рис. 5. Бесспорно лишь то, что с ростом скорости растут потери на трение. Если построить на реке плотину, то, повторяем, сечение русла реки расширится, скорость упадет, а ликвидированная таким образом часть потерь на трение превратится в электроэнергию.

Но электроэнергию из реки можно получить, не уменьшая скорость воды, а снижая шероховатость поверхности, по которой течет вода. На этом принципе работают многие мини ГЭС. Что это такое?

Вдоль русла горной реки или ручья прокладывают стальную или пластиковую трубу (водовод) и пускают по ней часть воды, которая будет бежать не по неровному и каменистому дну реки или ручья, а по гладкой трубе. Потери на трение резко упадут, чем «не преминет воспользоваться» гидротурбина, установленная на нижнем конце трубы (водовода). На рис. 3 поток воды на реке без ГЭС изображен волнистой линией, которая в устье плавно заканчивается у моря. Если этот поток поместить в гладкую трубу, то он будет бить огромным фонтаном на нижнем конце трубы. Такие «фонтаны», кстати, можно видеть у нижнего бьефа плотины, когда воду из водохранилища сбрасывают минуя гидроагрегаты. Этот фонтан, можно сказать, затыкают гидротурбиной капсульного или иного типа.

На рисунке 6 показан расчет в среде SMath потери напора Δh и давления Δp в трубопроводе с внутренним диаметром d 300 mm и длиной L 30 m, по которому перегретый водяной пар под давлением p 13 МПа и с температурой 550°C поступает из парового котла в турбину – см. схему на рис. 9.17. Расход пара 900 тонн в час или, как будет подсчитано, 6.715 метров кубических в секунду.

Главное в таком расчете – это определить коэффициент трения о внутреннюю поверхность трубы. Эта зависимость графически отображена на рис. 5 и реализована в виде функции пользователя, показанной сверху рис. 6. Физика и математика, заложенные в эту функцию, описаны здесь [6]. В программе на рисунке 6 вместо хорошо известного оператора `if` (если) применена менее известная пользователям SMath функция `cases` (случаи), которая более наглядна.

Функции
{:}

$$\lambda_f(\Delta, Re) := \begin{cases} \frac{64}{Re} & \text{if } Re < 2300 \\ \text{"_"} & \text{if } Re < 4000 \\ \frac{0.3164}{Re^{0.25}} & \text{if } Re \leq \frac{10}{\Delta} \\ \text{case} \begin{cases} 0.11 \cdot \left(\Delta + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} & \text{if } Re \leq \frac{560}{\Delta} \\ 0.11 \cdot \Delta^{0.25} & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases}$$

case

cases

Define piecewise functions.

$q := 900 \frac{\text{t}}{\text{hr}}$
 $d := 350 \text{ mm}$
 $L := 30 \text{ m}$

Исходные
данные

$\Delta := 2 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$
 $p_{BX} := 13 \text{ MPa}$
 $T := 550 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho := \text{wspDPT}(p_{BX}, T) = 37.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad Q := \frac{q}{\rho} = 6.715 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$F := \pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 962.1 \text{ cm}^2 \quad v := \frac{Q}{F} = 69.7939 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\mu := \text{wspDYNVISPT}(p_{BX}, T) = 3.1291 \cdot 10^{-5} \text{ s Pa}$$

$$\mu = 0.03129 \frac{\text{N mm}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \quad \text{Более правильная единица вязкости}$$

$$Re := \frac{d \cdot v}{\frac{\mu}{\rho}} = 2.9065 \cdot 10^7 \quad \lambda_f(\Delta, Re) = 0.0233$$

$$\Delta h := \lambda_f(\Delta, Re) \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 g_e} = 495.2 \text{ m}$$

$$\Delta p := \Delta h \cdot \rho g_e = 1.784 \text{ atm} \quad \text{Ответ}$$

Рис. 6 Расчет потери напора и давления в паропроводе