

«Облачные» функции для инженерных расчетов водоснабжения

Д.т.н, профессор В.Ф. Очков

К.т.н., доцент К.А. Орлов

Аспирант Чжо Ко Ко

Студент Д.А.Анохин

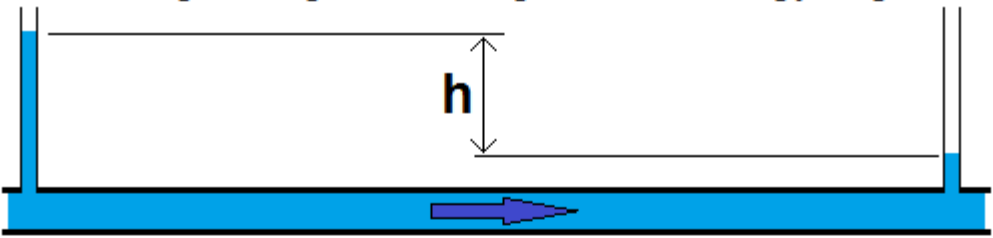
НИУ «Московский энергетический институт»

Дано описание технологии гидротехнических расчетов, использующей ссылки на интернет-функции («облачные» функции) по свойствам воды и параметрам водоводов.

При решении научно-технических и инженерных задач, в частности, задач водоснабжения и канализации необходимо знать свойства воды, материалов, контактирующих с водой, и параметры рассчитываемых процессов.

В настоящее время почти все подобные расчеты ведутся на компьютерах с использованием специализированным программам или в среде различных инженерных калькуляторов: Matlab, Mathcad и др., а также очень часто в среде табличного процессора Excel. Компьютеры, на которых проводятся расчеты, как правило, имеют выход в Интернет и рука инженера, проводящего расчеты, тянется за справкой не к полке с книгами, а к... мышке компьютера. Дело в том, что сейчас почти вся научно-техническая информация «переползла» с бумажных носителей в Интернет. В данной статье будет показано, как можно использовать «всемирную паутину» для решения несложной, но типичной задачи водоснабжения – задачи о потере напора воды в горизонтальном трубопроводе.

Расчет потери напора воды в горизонтальном трубопроводе



Исходные данные

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

Решение со ссылками на "облачные" функции из web-справочников:
<http://tw.t.mpei.ac.ru/rbtpp> и <http://tw.t.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://tw.t.mpei.ac.ru/rbtpp/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://tw.t.mpei.ac.ru/rbtpp/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://tw.t.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. 1. Расчет потери напора в трубопроводе.

Создано множество программ для компьютеров по расчету трубопроводов разной степени сложности и детализации. Они 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 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 расчетные 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 справочниках – бумажных и интернетовских в виде таблиц или эмпирических формул, связывающих вязкость воды с ее температурой. Причем эти данные, полученные из таблиц и формул различных довольно солидных справочников, могут существенно различаться. Кроме того, инженер при переносе чисел из таблицы в конкретный расчет 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 сотрудничает два первых автора этой статьи. 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. 2.

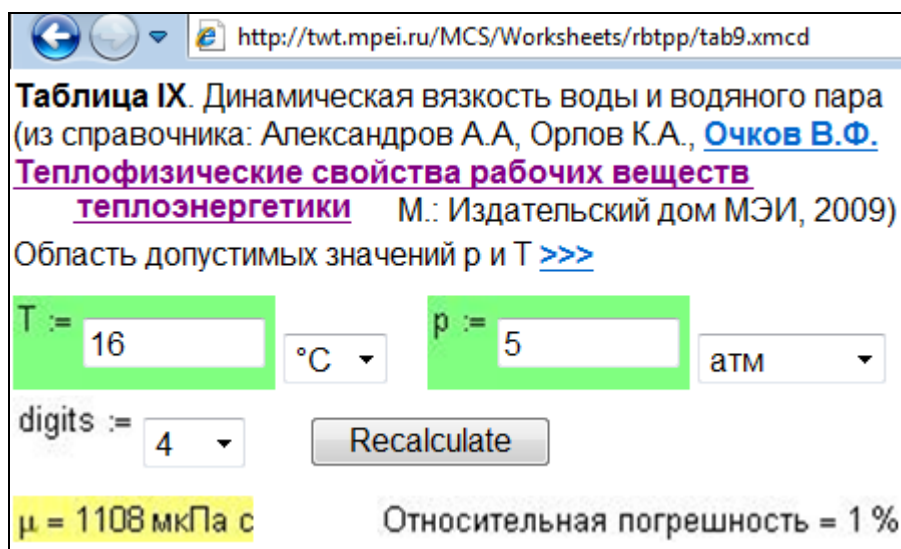


Рис. 2. Сайт Интернета с интерактивным расчетом динамической вязкости воды.

Зайдя на сайт, показанный на рис. 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 разных областях давления и температуры. Этот расчетный «черный ящик» (см. выше) можно приоткрыть – узнать из данного web-справочника, по каким формулам рассчитывалась динамическая вязкость воды и/или водяного пара.

В НИУ «Московский энергетический институт» (www.mpei.ru) на кафедре Технологии воды и топлива разработана новая интернет-технология работы со свойствами воды и водяного пара, исключая ручной перенос данных из бумажного [1] или интернетовского (см. рис. 2) справочника.

В справочнике [1] собраны не только интерактивные сетевые расчеты по свойствам воды и/или водяного пара (см. пример на рис. 2), 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. 3.



Рис. 3. Список облачных функций по свойствам воды и водяного пара.

В списке, приведенном на рис. 3, 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 и стала доступна (видима, как говорят программисты) в Mathcad-расчете, необходимо узнать Интернет-

адрес этой «облачной» функции – <http://tw.t.mpei.ac.ru/rbtp/MC-WSP/M15/wspDYNVISCTD.xmcdz>. Для этого достаточно подвести курсор мышки к ссылке на нужную функцию (см. подчеркнутые их названия на рис. 3), нажать правую кнопку мышки и отдать команду «Свойства (Properties)». После этого действия на экране дисплея появится окно с Интернет-адресом нужной функции – см. рис. 4.

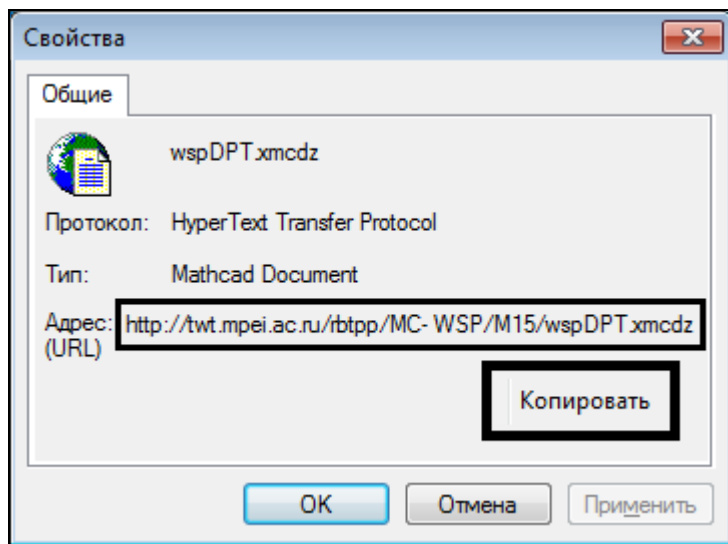


Рис. 4. Адрес облачной функции «Динамическая вязкость воды и водяного пара»

Далее этот адрес необходимо скопировать и вставить в диалоговое окно «Вставка ссылки» программы Mathcad, где проводится расчет потери напора воды в трубопроводе или иной другой расчет, требующий знания плотности воды ρ – см. рис. 5.

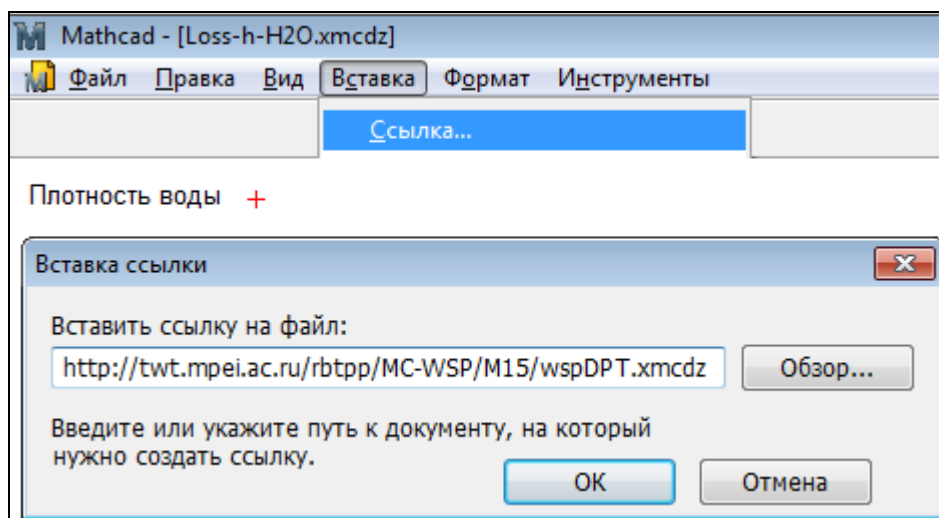


Рис. 5. Вставка в расчет «облачной» функции по плотности воды.

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

По значениям плотности воды и ее динамической вязкости в расчете, показанном на рис. 1, 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 , определяющий наряду с шероховатостью внутренней поверхности трубы искомое значение потери напора воды за счет трения о стенку трубы.

В справочной литературе зависимость относительного безразмерного коэффициента сопротивления течению жидкости в круглой трубе λ дается либо графиками, либо набором формул. На рис. 6 показан сайт Интернета 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).

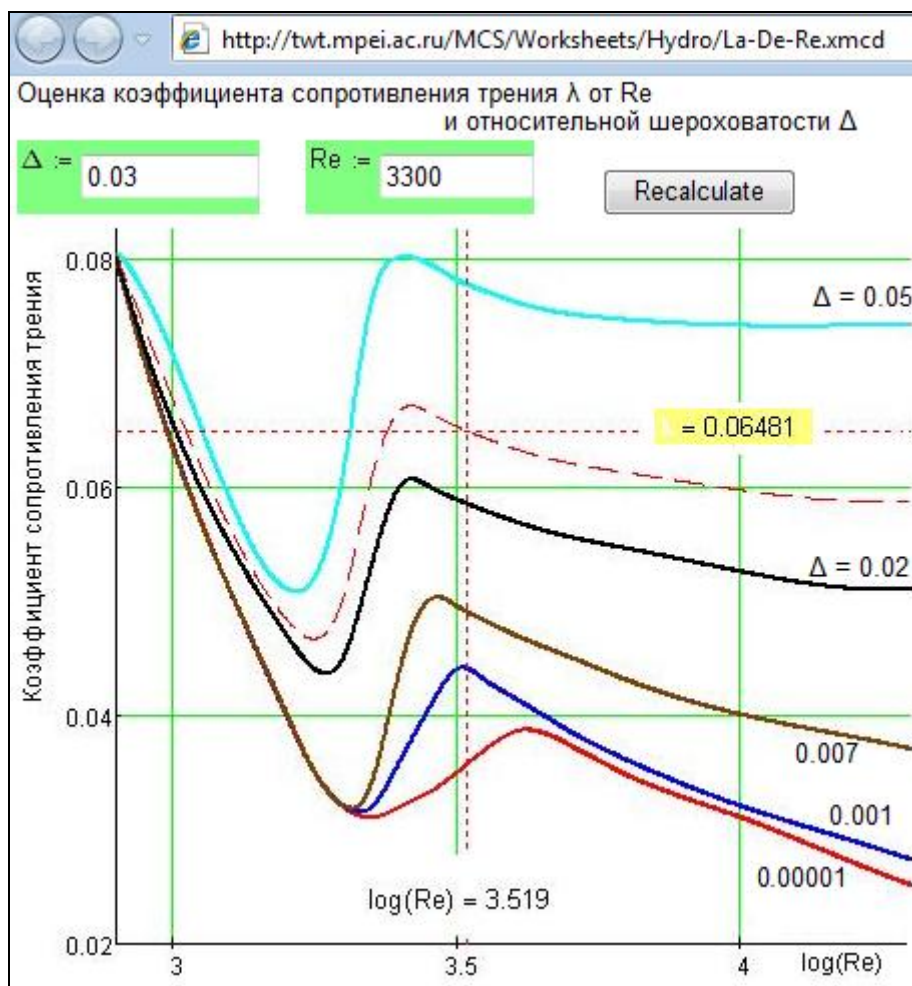


Рис. 6. Графическая зависимость относительного коэффициент трения от параметров течения воды в круглой трубе.

Посетитель сайта, показанного на рис. 6, 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 области переходной 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. 6, обсчитываются по формулам, показанным ниже на рис. 7.

На расчетном портале НИУ МЭИ, где расположены описываемые в статье сайты, есть и справочник по гидрогазодинамике (<http://tw.t.mpei.ac.ru/GDHB/hgd.html>). В этом web-справочнике, помимо других полезных для гидротехнических расчетов функций, 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 показана на рис. 7 и вставлена в расчет, показанный на рис. 1, с помощью вышеописанного инструмента ссылки на «облачную» функцию.

$\lambda_{\text{friction}}(\Delta, Re) :=$	$\begin{aligned} &\text{return } \frac{64}{Re} \quad \text{if } Re \leq 2300 \\ &\text{return NaN} \quad \text{if } 2300 < Re \leq 4000 \\ &\text{"Формула Блазиуса"} \quad \text{return} \quad \text{if } 4000 < Re \leq \frac{10}{\Delta} \\ &\quad \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \\ &\text{"Формула Альтшуля"} \quad \text{return} \quad \text{if } \frac{10}{\Delta} < Re < \frac{560}{\Delta} \\ &\quad 0.11 \cdot \left(\Delta + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \\ &\text{"Формула Альтшуля"} \quad \text{otherwise} \\ &\quad 0.11 \cdot \Delta^{0.25} \end{aligned}$
$\lambda_{\text{friction}}(0.0005, 91861) = 0.02064$	

Рис. 7. Набор формул по расчету относительного коэффициент трения от параметров течения воды в круглой трубе.

В литературе можно найти различные «именных» формулы для расчета коэффициента трения в зависимости от Re и Δ . Брать из этого набора формул 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 за счет коррозионно-эрозионных процессов или за счет отложений в трубах. В принципе, при расчете потери напора (рис. 1) 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, определяющим наряду с другими неопределенностями (с неопределенностью диапазона значений числа Рейнольдса и самих формул для расчета λ – см. рис. 7) ожидаемый диапазон возможного изменения рассчитанного значения потери напора.

Послесловие

Формулу, являющуюся ключевой при расчете потери напора (она заключена в рамку на рис. 7), всегда хочется упростить – «загнать», например константы 2 и g (ускорение свободного падения) из знаменателя в коэффициент сопротивления λ . Но этого нельзя делать по ряду причин. Во-первых, ускорение свободного падения g ($9,81 \text{ м/с}^2$) 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://tw.t.mpei.ac.ru/ТТНВ/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 будущем трубопроводы могут проектироваться и строиться на... Луне или на Марсе, где значение g совсем не $9,81 \text{ м/с}^2$. 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 g принимается равным 10 м/с^2 , а плотность воды – 1000 кг/м^3 . По найденному нами на рис.1 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 g нельзя убрать в формуле 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 статье, 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 микро ГЭС 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- (дополнительными) электростанциями оборудованы некоторые газовые турбины крупных электростанций. Один из авторов когда-то давно видел интересное гидротехническое устройство в Литве. В одном овраге стекала вода с перепадом высот 2-3 метра. 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 электродиализные аппараты обессоливания поступает морская (соленая) вода и электроэнергия, а выходит пресная (обессоленная вода) и концентрат. Но эти аппараты *обратимые*. Если в него подавать отдельно 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 подается соленая вода и электричество, а из которого выходят два потока воды – обессоленная вода (пермеат) и концентрат. Но принципы действия электродиализных и обратноосмотических аппаратов обессоливания различные. В электродиализном аппарате электрический ток непосредственно подается на специальные электроды, заставляющие ионы воды (катионы и анионы солевых примесей) 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 солесодержанием. Но тут не будет прямой выработки электроэнергии как в электродиализном аппарате. В *обратно* *обратно* осмотической электростанции, т.е. просто в осмотической электростанции придется энергию напора воды (осмотическое давление) 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 на мембранные установки ультрафильтрации и обратного осмоса. При этом резко снижается 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.

Выводы.

Данная работа выполняется в рамках проекта Национальный исследовательский университет МЭИ: «Информационная поддержка энергетики, энергоэффективности и энергосбережения – создание центра по теплофизическим свойствам веществ и решений для энергетики». Она позволяет снабдить инженеров, занимающихся проектированием, сооружением, наладкой, эксплуатацией, ремонтом и выводом их эксплуатации (утилизацией) энергетических объектов и систем водоснабжения «облачной» базой данных [2-3].

Описываемый расчет (рис. 7) можно скачать с адреса <http://twf.mpei.ac.ru/GDHB/Loss-h-H2O.xmcdz>.

Сама статья с дополнительными материалами и работающими гиперссылками расположена на сайте автора по адресу <http://twf.mpei.ac.ru/GDHB/CloudFunction.pdf>

Литература:

1. Александров А.А, Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. - М.: Издательский дом МЭИ, 2009. - 224[8] с.: <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp>
2. Очков В.Ф. , Орлов К.А., Френкель М.Л., Очков А.В., Знаменский В.Е. «Облачный» сервис по свойствам рабочих веществ для теплотехнических расчетов // Теплоэнергетика №7, 2012 г. С. 79-86. <http://twt.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, С. 222-223 http://inforino2012.mpei.ru/App_Text/proc.pdf