

УДК 621.1.36.7(035.5)

Применение облачных технологий для проведения теплотехнических расчетов

© 2013 г. Очков В.Ф.^{1,2}, Орлов К.А.¹, Очков А.В.¹, Знаменский В.Е.¹НИУ МЭИ¹ – Объединенный институт высоких температур РАН²

Описана технология теплотехнических расчетов с использованием облачных функций по свойствам рабочих веществ энергетических циклов, а также типовых облачных формул и инструкций по их применению (формуляций) для расчетов.

Ключевые слова: теплотехнические расчеты, Mathcad, теплофизические свойства рабочих тел, термодинамические циклы.

DOI: 10.1134/S0040363613090087

Теплотехнические расчеты требуют знания не только теплофизических свойств рабочих веществ (вода и/или водяной пар, воздух, дымовые газы и др.) [1–4] и материалов энергетики, но и формул для расчетов. Эти формулы ~~с формуляци~~~~ями~~ берутся из различных справочников, например из [5], или из Интернета и переносятся в соответствующие расчеты. Такая работа не очень удобна – она замедляет выполнение расчетных проектов и повышает риск появления ошибок. В связи с этим, а также с учетом того, что в настоящее время компьютеры почти всех специалистов, выполняющих теплотехнические и другие инженерные расчеты, имеют постоянный и высокоскоростной выход в Интернет, нами была разработана новая технология работы с формулами, которая будет проиллюстрирована несложными типовыми примерами в среде инженерного офиса (калькулятора) Mathcad [6], весьма популярного среди студентов, инженеров и научно-технических работников.

Облачная технология работы с формулами является продолжением подхода, приведенного в [4] и связанного с использованием функций, хранящихся в Интернете, для расчета свойств рабочих тел энергетики. Поясним кратко работу с этими функциями.

При проектировании какого-либо теплотехнического объекта после ввода исходных данных в расчет вставляется ссылка на Mathcad-документ, хранящийся в Интернете (в “облаках”) по адресу <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ/Н2О.xmcdz>. После нее в рабочем документе станут видимыми

все функции, определенные в документе, на который сделана ссылка. Это не только функции, возвращающие теплофизические свойства воды и водяного пара: удельную энтальпию h , удельную энтропию s , температуру T , степень сухости x и др. [1], но и функции, возвращающие параметры некоторых теплотехнических процессов (дросселирования в регулирующем клапане или расширения пара в паровой турбине) – значения удельной энтальпии и степени сухости пара в конце этих процессов. Имена этих двух функций имеют корень в имени EXPANSIONPTPEFF³: expansion – расширение, PT – давление и температура пара в начальной точке, P – давление пара в конечной точке и EFF (efficiency) – внутренний КПД процесса.

Такой подход является альтернативой использованию специализированных программных средств для расчета свойств рабочих веществ [7], для работы с которыми необходимо скачать и установить саму программу на компьютер. При использовании облачных функций необходимость отдельного скачивания и установки таких программ отсутствует. Большим плюсом также является возможность оперативного обновления функций – пользователь всегда имеет дело с самой последней версией расчета.

Среди недостатков облачных функций следует отметить необходимость доступа в Интернет при выполнении расчетов. В этом случае выходом может быть ~~“прозрачный”~~ переход на обычные про-

¹ 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14. НИУ МЭИ.² 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13. ОИВТ РАН.³ У имен всех функций приставка wsp. Это аббревиатура программы WaterSteamPro, которую можно скачать с сайта www.wsp.ru. Описываемые в этой статье облачные функции являются малой частью пакета WaterSteamPro.

граммы. Так, при отсутствии доступа в Интернет можно установить программу [7] и примеры, приведенные в настоящей статье, будут работать. Это обеспечивается одинаковыми именами и аргументами функций для расчета свойств рабочих тел.

Использование облачных технологий для формул и наборов формул означает доступ пользователя к готовым расчетам, которые он может напрямую применять в своих разработках и которые представляют собой решения конкретных задач. В настоящей статье будут показаны несколько примеров таких облачных расчетов.

Пример 1. Необходимо рассчитать процессы дросселирования водяного пара в регулирующем клапане и последующего его расширения в ~~напорной~~ турбине. Требуется также отобразить эти процессы на h , s - и T , s -диаграммах воды и водяного пара. Данный расчет в среде Mathcad показан на рис. 1.

Первыми операторами расчета, показанного на рис. 1, вводятся исходные данные: давление p_1 и температура T_1 свежего пара, давление, до которого пар дросселируется, p_2 ⁴ и давление в конце процесса расширения пара в турбине (давление в конденсаторе – p_3). Кроме того, задаются внутренние относительные КПД этих процессов $\eta_{\text{вн.отн}}$. Если КПД равен 100%, то это идеальный процесс расширения пара в турбине, при котором значение энтропии пара не меняется. Если этот КПД равен 0%, то это идеальный процесс дросселирования пара, при котором энтальпия остается постоянной. При реальном дросселировании (например, при прохождении пара по паропроводу) энтальпия пара немного уменьшается, что и определяет значение внутреннего относительного КПД дросселирования отличное от нуля (5% в расчете, показанном на рис. 1).

Имея под рукой готовые функции, можно быстро и безошибочно рассчитать все требуемые параметры расширения пара и отобразить его на диаграммах, на которых дополнительно показаны линии насыщения по воде и водяному пару, а также линия постоянной степени сухости (влажности) пара. Все эти линии довольно легко построить на графиках, имея видимыми в расчете соответствующие функции: `wspHSST` – удельная энтальпия насыщенного водяного пара в зависимости от температуры, `wspHSWT` – то же для воды на линии насыщения. Если в именах этих двух функций букву H заменить на S, то они будут выдавать удельные энтропии воды и водяного пара на линии насыщения. Для построения линии по-

стоянной влажности пара используются две функции: `wspHSTX` и `wspSSTX`, возвращающие удельную энтальпию и удельную энтропию влажного пара в зависимости от его температуры и степени сухости. На h , s -диаграмме построены параметрические графики: задается параметр T (на рис. 1 эта область скрыта, а на рис. 2 – открыта) в интервале от критической точки воды до ее тройной точки (эти константы также становятся видны в расчете после ссылки, описанной выше), а на осях зафиксированы три пары функций от T . На T , s -диаграмме на оси y проставлен аргумент (температура), а на оси x – функции. В последней версии Mathcad введен множитель/°C, позволяющий использовать на осях графика шкалу Цельсия (см. рис. 2). По умолчанию на них температура имеет шкалу Кельвина (см. второй график на рис. 1).

Пример 2. Насос поднимает давление воды до значения p_1 (линия насыщения воды) до значения p_2 с внутренним относительным КПД процесса $\eta_{\text{вн.отн}}$. Затем вода изобарно нагревается до точки кипения. Определить параметры этих процессов и отобразить их на T , h -диаграмме.

На рис. 2 показан этот расчет с использованием облачных функций. Он отличается от расчета, приведенного на рис. 1, только двумя деталями. Во-первых, для расчета процесса повышения давления используется не функция `wspEXPANSIONPTPEFF`, а функция `EXPANSIONPTPXEFE`, у которой есть дополнительный аргумент x – степень сухости. Для воды он равен 0, а для насыщенного пара – 1. Во-вторых, на предыдущем рисунке точки 1, 2 и 3 были соединены прямыми линиями. На рис. 2 линии, отображающие процессы повышения давления в насосе и нагрева воды в экономайзере, показаны на графике по-иному: для этого были сгенерированы векторы давления vp , удельной энтальпии vh , температуры vT и удельной энтропии vs для процессов 1–2 и 2–3 (см. рис. 2). Так приходится поступать в тех случаях, когда линия на диаграмме не является прямой или близкой к ней. Таким же образом следует строить графики и на рис. 1–2 (дросселирование с КПД, равным 5%) и 2–3 (расширение пара в турбине с внутренним относительным КПД процесса, равным 75%), но вид этих линий определить довольно трудно, так как КПД может быть различным на разных участках процесса. Линия 2–3 на рис. 2 не является прямой. В этом можно убедиться, расширив область диаграммы. Поэтому при построении данной линии потребовались векторы. То же было сделано и с линией 1–2.

На рис. 2 была построена T , h -диаграмма, а не h , s - или T , s -диаграмма. T , h -диаграммы редко используются для иллюстрации паротурбинных циклов, но здесь она задействована по следующей причине. В настоящее время студенты-тепло-

⁴ Мы задали очень большой перепад давления (24–10 МПа) для того, чтобы этот процесс был отображен на диаграммах (см. рис. 1). На реальных ТЭС потеря давления в паропроводе от котла до турбины составляет около 5%. Если ввести p_2 меньшее, чем p_1 , на эти 5%, то точки 1 и 2 сольются в одну.

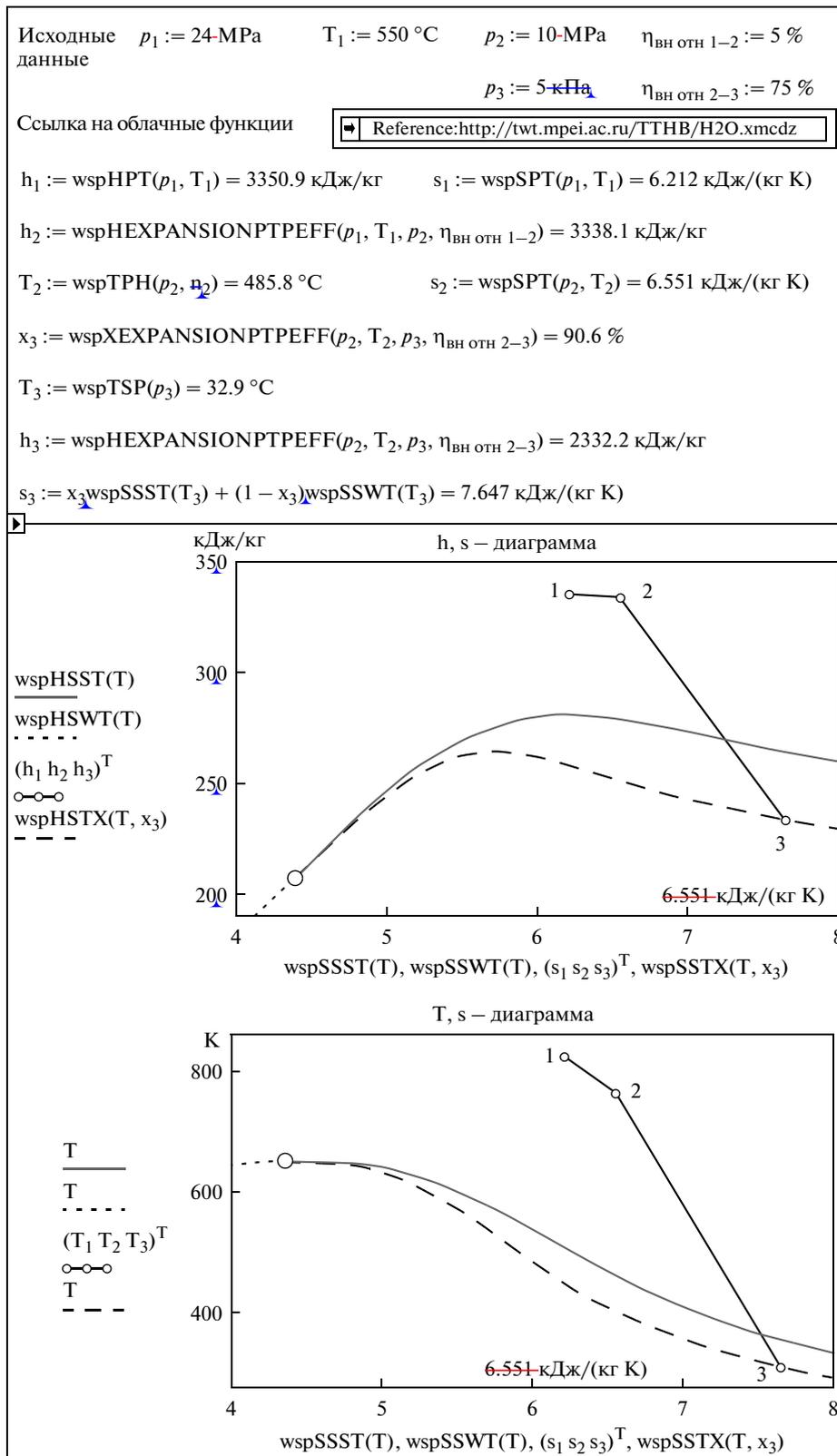


Рис. 1. Расчет процессов дросселирования и расширения пара в турбине

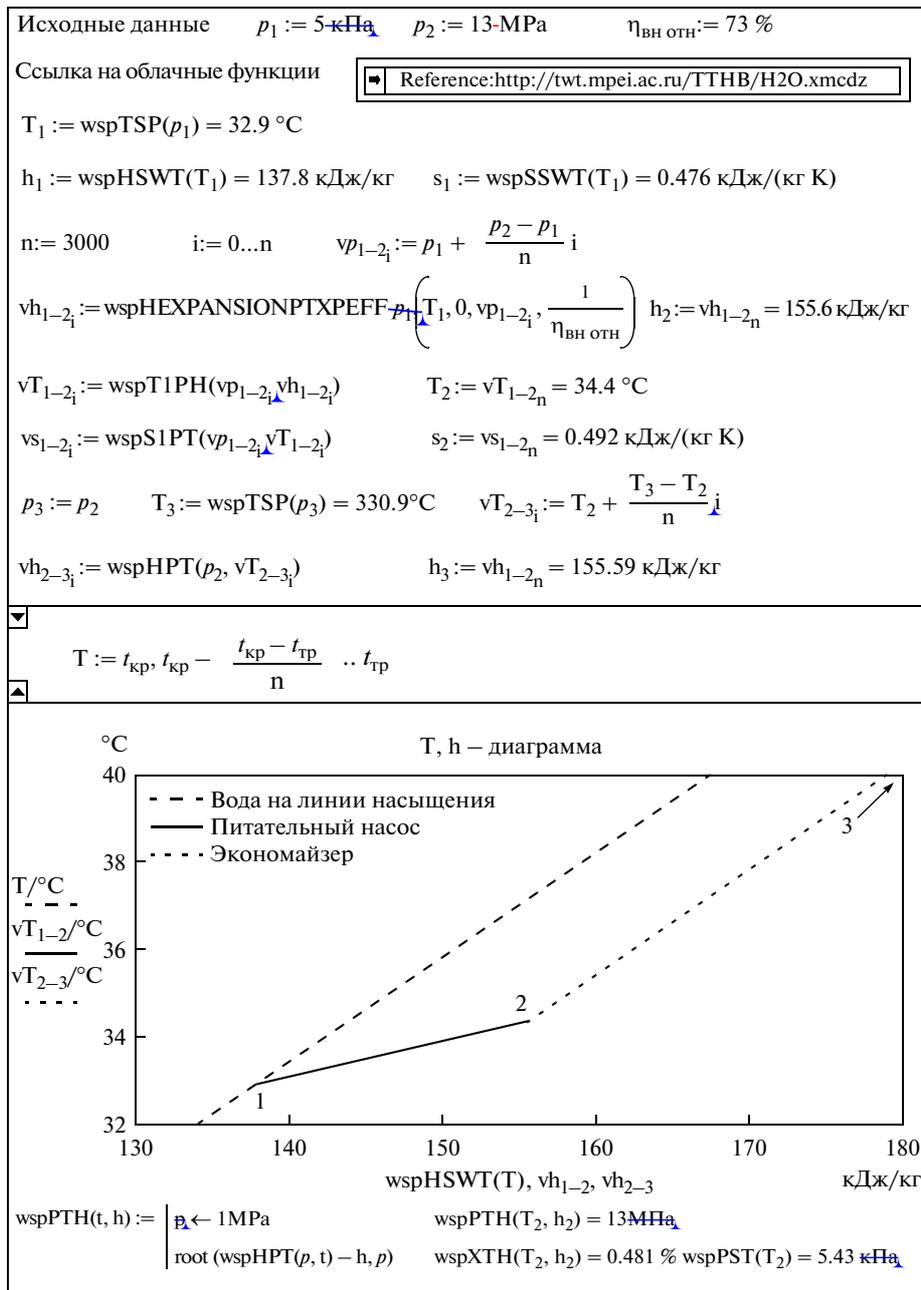


Рис. 2. Расчет работы насоса

энергетики, увлекающиеся компьютерами, стали строить не только традиционные плоские диаграммы паротурбинных циклов (h , s - и T , s -диаграммами – см. рис. 1), но и трехмерные, объемные диаграммы, например h , T , s -диаграммы [8]. Две плоскости такой объемной диаграммы показаны на рис. 1, а третья T , h – на рис. 2. Глядя на него, можно ошибочно предположить, что процесс повышения давления воды накладывается на двухфазную область, которая должна находиться правее линии насыщенной воды, но это не так. Эта область отображает два участка термодина-

мической поверхности воды в h -, T - и S -координатах. В точке 2 вода имеет параметры: $p = 13 \text{ МПа}$, $t = 34.4 \text{ }^\circ\text{C}$ и $h = 156.6 \text{ кДж/кг}$. Но такие же параметры по T и h имеет и аналог точки 2 – двухфазная жидкость: вода с паросодержанием 0.481%, температурой $34.4 \text{ }^\circ\text{C}$ и под давлением 5.34 кПа.

Пользователь Mathcad может расширить список облачных функций, хранящихся в документе по адресу <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/Н2О.xmcdz>, используя инструменты решения уравнений и систем, поиска нулей функций. Так, внизу на рис. 2 показаны создание и вызов функции wspPTH ,

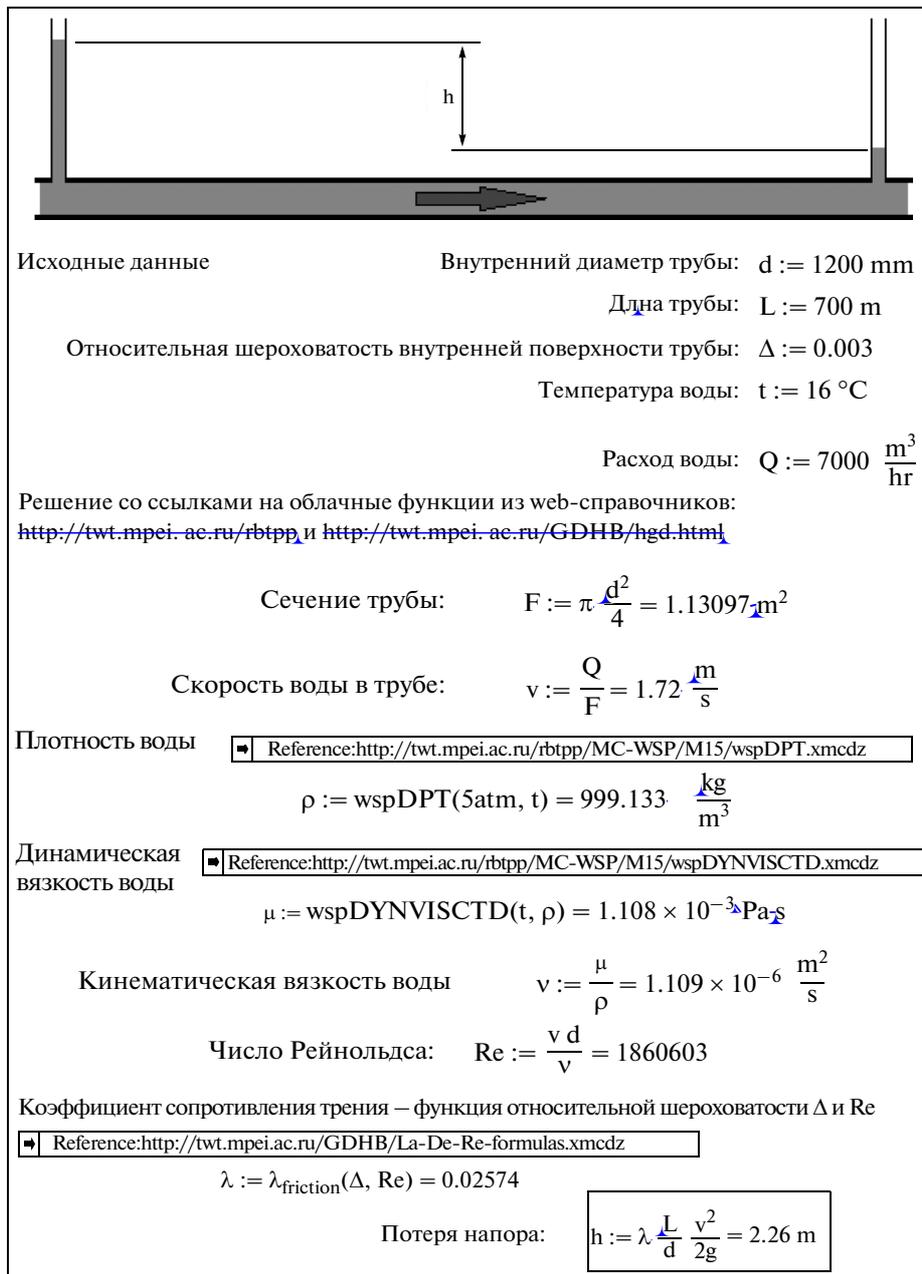


Рис. 3. Расчет потери напора в трубопроводе

возвращающей давления воды и/или водяного пара в зависимости от температуры и удельной энтальпии (одна из двух обратных функций `wspНРТ` пакета облачных функций по адресу <http://tw.t.mpei.ac.ru/ТТНВ/Н2О.xmcdz>). Созданная функция `wspРТН` использует встроенную в Mathcad функцию `root` и возвращает значение давления по температуре и удельной энтальпии вблизи точки первого приближения по давлению (1 МПа). Мы не приводим полный список функций пакета, так как он непрерывно дополняется.

Пример 3. Необходимо рассчитать потерю напора в трубопроводе, по которому прокачивается вода (рис. 3). Для расчета потери напора в трубопроводе инженер должен вспомнить или найти в бумажных или web-справочниках набор соответствующих формул и правил их применения – формуляций. Кроме того, инженеру необходимо знать некоторые свойства воды, в частности для данной задачи ее кинематическую вязкость ν и плотность ρ . Эти значения приводятся в виде таблиц или эмпирических формул, связывающих вязкость воды и ее плотность с температурой.

Причем эти данные, полученные из таблиц и формул, представленных в разных серьезных литературных источниках, могут существенно различаться. Кроме того, инженер при переносе чисел из таблицы в конкретный расчет может допустить ошибку, связанную с неправильной интерполяцией и даже с неточным набором цифр на клавиатуре компьютера и/или неверной интерпретацией единиц измерения и множителя при них. Все это усложняет и замедляет расчеты, повышает вероятность появления 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 сотрудничают два первых автора этой статьи. На основе формуляций IAPWS во всем мире выпускаются справочники с таблицами, содержащими 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 <http://twt.mpei.ac.ru/rbtp>, облегчающим и ускоряющим работу со справочником.

По значениям плотности воды и ее динамической вязкости в расчете, показанном на рис. 3, определяется значение кинематической вязкости ν . Ранее в расчет было введено значение внутреннего диаметра трубы d и рассчитано значение скорости воды в ней v . По этим трем параметрам (скорость, диаметр и вязкость) вычисляется 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 стенки трубы.

В справочной литературе зависимость относительного безразмерного коэффициента сопротивления течению жидкости в круглой трубе дается в виде либо графиков, либо набора формул. На сайте <http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Hydro/La-De-Re.xmcd> размещена интерактивная номограмма (“ложка Никурадзе”), связывающая рассматриваемый коэффициент сопротивления λ с числом Рейнольдса Re и относительной шероховатостью поверхности Δ [отношения средней высоты выступов (шероховатостей) внутренней поверхности трубы к ее внутреннему диаметру]. Посетитель данного сайта может изменить значения Δ и Re , нажать кнопку Recalculate и получить не только результат расчета, но и вид этой зависимости в самой “интересной” области – в режиме перехода от ламинарного течения к турбулентному, в котором не рекомендуется эксплуатировать трубопроводы.

На расчетном портале НИУ МЭИ, где расположены описываемые в статье сайты, есть и справочник по гидрогазодинамике (<http://twt.mpei.ac.ru/>

GDHB/hgd.html). В этом web-справочнике, помимо других полезных для гидротехнических расчетов функций, хранится и облачная функция, возвращающая значение коэффициента трения в зависимости от числа Рейнольдса в широком его диапазоне и относительной шероховатости внутренней поверхности круглой трубы. В литературе можно найти различные “именные” формулы для расчета коэффициента трения в зависимости от Re и Δ : Блазиуса, Конакова, Альтшуля, Никурадзе и др. Выбрать из этого набора формул можно любую, особо не задумываясь об ее точности, потому 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, цельнотянутая и т.д.) и особенностей производства. Кроме того, шероховатость внутренней поверхности трубы может меняться при ее простое или эксплуатации из-за коррозионно-эрозионных процессов или образования отложений. При расчете потери напора требуется вводить в качестве исходных данных не конкретные 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 – см. рис. 3) ожидаемый диапазон возможного изменения рассчитанного значения потери напора.

Формулу, являющуюся ключевой при расчете потери напора (она заключена в рамку на рис. 3), всегда хочется упростить – перенести, например, константы 2 и g 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://twt.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-нибудь в будущем трубопроводы, возможно, будут проектироваться и строиться на Луне или Марсе, где значение g существенно отличается от $9,81 \text{ м/с}^2$. Интересно, применима ли предлагаемая формула для определения потери напора в водопроводе или топливопроводе на

космической станции, где $g = 0$? Да, константу g нельзя убрать в формуле расчета потери напора в трубопроводе и перенести ее в коэффициент λ . Двойку в знаменателе тоже нельзя перенести в коэффициент сопротивления λ , но уже по другим причинам. Формула потери напора отображает фундаментальный закон физики, связывающий изменение потенциальной и кинетической энергии потока жидкости вследствие трения о стенки трубопровода и перевод этих видов энергии в менее ценную – тепловую. В горизонтальном трубопроводе (упрощенная задача) потенциальная энергия не меняется, а кинетическая ($mV^2/2$) – меняется. Так что “два” в знаменателе в формуле потери напора вполне уместна – без нее будет менее понятен физический смысл задачи.

Технологии ссылок и скачивания, описанные в данной статье, имеют свои плюсы и минусы. Компромиссная (промежуточная) информационная технология – это установка на своем компьютере программы WaterSteamPro [7] и регулярное ее обновление. Если же теплотехнические расчеты ведутся на компьютерах с надежной связью с Интернетом, то можно применять технологию ссылок, описанную в данной статье. Технология ссылок на интернет-функции открывает пользователям доступ к богатому набору других полезных для теплоэнергетиков функций, размещенных на расчетном сервере НИУ МЭИ – ОИВТ РАН – ООО “Триеру”.

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

Таким образом, данная работа выполняется в рамках проекта Национального исследовательского университета 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 из эксплуатации (утилизацией) энергетических объектов, с помощью облачной базы данных сведений о свойствах веществ и набором формул для расчетов.

Список литературы

1. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. М.: Издательский дом МЭИ, 2009 (см. <http://twf.mpei.ac.ru/rbtp>).
2. Теплофизические свойства воды и водяного пара в Интернете / А.А. Александров, В.Ф. Очков, К.А. Орлов, А.В. Очков // Промышленная энергетика. 2007. № 2 (см. <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WspIn>).
3. Александров А.А., Очков В.Ф., Орлов К.А. Уравнения и программа для расчета свойств газов и продуктов сгорания // Теплоэнергетика. 2005. № 3. С. 48–55.
4. “Облачный” сервис по свойствам рабочих веществ для теплотехнических расчетов / В.Ф. Очков, К.А. Орлов, М.Л. Френкель и др. // Теплоэнергетика. 2012. № 7. С. 79–86 (см. <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Web-function-Power.pdf>).
5. Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. М.: Издательство МЭИ, 2004.
6. Очков В.Ф., Утенков В.Ф., Орлов К.А. Теплотехнические расчеты в среде Mathcad // Теплоэнергетика. 2000. № 2. С. 73–78.
7. Программный комплекс “WaterSteamPro” для расчета теплофизических свойств воды и водяного пара / К.А. Орлов, А.А. Александров, В.Ф. Очков и др. // X Рос. конф. по теплофизическим свойствам веществ: тезисы докл. Казань: Бутлеровские сообщения, 2002. С. 187–188.
8. Очков В.Ф. Построение диаграмм термодинамических циклов: шаг за шагом // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2009. № 2–3. С. 6–16.
9. “Облачные” функции для инженерных расчетов водоснабжения / В.Ф. Очков, К.А. Орлов, Ко Ко Чжо, Д.А. Анохин // Водоснабжение и канализация. 2013. № 1. С. 68–84 (см. <http://twf.mpei.ac.ru/GDHB/CloudFunction.pdf>).