

## Теплотехника: компьютерные расчеты с единицами измерения

В.Ф. Очков, К.А. Орлов, Е.В. Дорохов, В.М. Лавыгин  
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», г. Москва, Российская Федерация  
E-mail: ochkov@twf.mpei.ac.ru, orlov@twf.mpei.ac.ru, dor-evgenv@yandex.ru, LavyginVM@mpei.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В расчетной деятельности студентов и инженеров широко используется компьютерная вычислительная система Mathcad. При этом часто остаются невостребованными многие инструменты этой вычислительной системы. Использование единиц измерений в теплоэнергетических расчетах позволяет повысить их наглядность, избежать ряда расчетных ошибок и расширить возможности расчетных методик.

**Материалы и методы:** Используются методики моделирования процессов в области теплоэнергетики в вычислительной системе Mathcad с применением встроенных единиц измерения системы Mathcad.

**Результаты:** Показаны модули моделирования и расчета, характерные для теплоэнергетических задач. Рассмотрены достаточно простые примеры, наглядно отражающие преимущества применения встроенных в Mathcad единиц измерения.

**Выводы:** Использование в математических пакетах при расчетах теплоэнергетических процессов единиц измерений позволяет студентам и инженерам, с одной стороны, исключить из расчетов некоторые ошибки, а с другой – лучше понимать физическую (теплотехническую) сущность расчетов, т.е. более эффективно решать профессиональные задачи.

**Ключевые слова:** теплоэнергетические расчеты, единицы измерений, теплофизические свойства, давление насоса, строительно-монтажная отметка, погрешность.

## Heat engineering: computer calculations with measurement units

V.F. Ochkov, K.A. Orlov, E.V. Dorokhov, V.M. Lavygin  
National Research University «MPEI», Moscow, Russian Federation  
Email: ochkov@twf.mpei.ac.ru, orlov@twf.mpei.ac.ru, dor-evgenv@yandex.ru, LavyginVM@mpei.ru

### Abstract

**Background:** Students and engineers widely use the Mathcad computer system in calculations. But they often ignore many of the tools of this computer system. The use of measurement units in thermal power calculations can increase their visibility, help to avoid some calculation errors and enhance the calculation methods potential.

**Materials and Methods:** The study employs techniques of power system processes simulation in the Mathcad computer system with built-in Mathcad system measurement units.

**Results:** The paper shows modeling and calculation modules characteristic of heat and power applications. It also considers relatively simple examples that clearly reflect the benefits of using built-in Mathcad measurement units.

**Conclusions:** The use of measurement units in mathematical packages when calculating heat power processes allows students and engineers, on the one hand, to exclude some errors from the calculation and, on the other hand, to better understand the physical (heat engineering) essence of the calculations, i.e. to deal more effectively with their professional tasks.

**Key words:** thermal engineering calculations, units of measurement, thermal and physical properties, pump pressure, construction and erection mark, error.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.010-018

В настоящее время инженерные и научно-технические расчеты проводятся сугубо на компьютерах. Это, естественно, касается и теплотехнических расчетов.

Компьютеры взяли на себя всю работу по арифметическим и прочим вычислениям. Современные программные средства (Mathcad, Maple [1, 2], SMath и др.) хранят в ячейках своей памяти (переменных, константах и функциях) не только численные значения, но и физические величины – длину, энергию, мощность, давление, температуру и т.д. Это намного ускоряет и облегчает расчеты, исключает многие ошибки в них.

Пакет Mathcad, примеры работы с которым будут приведены в статье, – это не просто математический, а физико-математический пакет. Но часто в реальном физическом Mathcad-расчете, там, где почти все величины имеют размерность массы, длины, силы и т. д., единицы измерения физических величин присутствуют не как множители у числовых констант, упрощающие расчет и позволяющие избежать ошибок, а как комментарии типа  $p = 120$  ‘давление в атмосферах.

Для примера на рис. 1 приведен модуль расчета необходимой толщины теплоизоляции паропровода.

Инструментарий Mathcad позволил быстро решить инженерную задачу, которую традиционно решали методом последовательного приближения по алгоритму, предложенному в СНиП. В этом расчетном документе все единицы измерений – отдельные текстовые области.

Наружный диаметр трубопровода  $d_{ст\_нар} := 0.2 \text{ м}$

Температура пара на входе в трубопровод  $t_{пар} := 560 \text{ } ^\circ\text{C}$

Температура окружающей среды  $t_{окр\_среды} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Расчет выполняется по методике, изложенной в "Своде правил СП 61.13330.2012 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003".

Предельная допустимая температура на поверхности теплоизоляции в обслуживаемой зоне (с плотностью 80 кг/м<sup>3</sup>)  $t_{пов\_из} := 55 \text{ } ^\circ\text{C}$

Средняя температура слоя теплоизоляции  $t_{из\_ср} := \frac{t_{пар} + 55}{2} = 307.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Коэффициент теплопроводности гибких матов из супертонкого базальтового волокна без связывающих веществ (с плотностью 80 кг/м<sup>3</sup>)

$$\lambda_{из} := 0.032 + 0.00019 \cdot t_{из\_ср} = 0.0904 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$$

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности теплоизоляции  $\alpha_n := 7 \text{ Вт/(м}^2\text{C)}$

Для реализации решения применяем итерационный поиск (оператор Given-Find)

Оцениваем начальное значение толщины слоя теплоизоляции  $\delta_{из\_0} := 0.05 \text{ м}$

Given

$$\ln\left(\frac{d_{ст\_нар} + 2 \cdot \delta_{из\_0}}{d_{ст\_нар}}\right) \cdot \alpha_n (d_{ст\_нар} + 2 \cdot \delta_{из\_0}) = \frac{t_{пар} - t_{пов\_из}}{t_{пов\_из} - t_{окр\_среды}}$$

Расчетная толщина слоя теплоизоляции

$$\delta_{из} := \text{Find}(\delta_{из\_0}) = 0.127 \text{ м}$$

Рис. 1. Расчет толщины теплоизоляции

В чем причины такого неполного использования возможностей Mathcad? Первая из них заключается в том, что некоторые пользователи не знают о таком полезном инструменте Mathcad, как встроенные константы, хранящие единицы физических величин, и переносят в среду Mathcad – в среду, повторяем, физико-математического пакета – приемы, выработанные за время общения с «нефизическими» языками программирования или с электронными таблицами, в которых переменные хранят только числовые значения, а их единицы измерения отмечены в комментариях и то далеко не всегда.

Есть и вторая группа пользователей Mathcad, которые не задействуют физические величины в расчетах, объясняя или оправдывая это тем, что все величины прописаны только в основных единицах одной из систем измерений (например, Международной СИ) и проблем с переводами единиц у них не возникает. Эта мотивация часто подкрепляется и тем, что Mathcad-документ без физических величин намного проще подготовить для компиляции в средах языков программирования – для перевода пользовательских функций в разряд встроенных по технологии DLL. Кроме того, Mathcad-документы с отключенным механизмом работы с единицами измерений (с имитацией этого механизма) работают быстрее и занимают меньше места в памяти компьютера. Но для большинства решаемых задач эти два параметра уже не являются лимитирующими факторами на современных компьютерах.

тирующими факторами на современных компьютерах.

Третья и основная причина отказа от физических величин в расчетах более глубокая. Она связана с некоторыми особенностями и недоработками инструментария физических величин, которые заставляют даже опытных пользователей изымать из почти уже готового расчета единицы измерения и переводить их в разряд комментариев. Например, физические величины в расчете, если не вникать в их «физическую» сущность, можно рассматривать как некие очень уместные комментарии в Mathcad-документе. Оператор  $p := 120$  – немой, а  $p := 120 \text{ atm}$  – «говорящий», не требующий каких-либо дополнительных пояснений. Единицы физических величин и комментарии роднит еще одна особенность, связанная, если так можно выразиться, с «психологией» создания расчетов. Ввод комментариев тормозит написание документа, как бы отвлекая человека от сути расчета. Часто ввод в расчет единиц измерения, как и в случае с комментариями, откладывается «на потом». Но, как уже отмечалось, очень часто этого «потом» не бывает – расчет заработал и выдает приемлемый результат, но при этом таит в себе реальные или потенциальные ошибки.

Вышесказанное будет проиллюстрировано несложными теплотехническими задачами.

На рис. 2 показана попытка расчета в среде Mathcad мощности насоса, перекачивающего несжимаемую жидкость (воду), по известной формуле: мощность – это произведение расхода жидкости на перепад давления на насосе<sup>1</sup>. В расчете единицы измерения физических величин отмечены в комментариях, а сам механизм единиц измерения отключен (рис. 1, диалоговое окно внизу). По умолчанию пакет Mathcad настроен на работу с Международной системой СИ, но если в расчете механизм единиц измерения по ряду причин, о которых мы писали выше, не задействован, то его рекомендуется совсем отключить, чтобы встроенные единицы измерения (A, V, s, m и т.д.) не мешали расчету.

В расчете, показанном на рис. 1, пользователь вводит исходные данные, базирующиеся не на основных, а на вспомогательных единицах измерения: не килограмм (кг), а тонна (т); не секунда (с), а час (ч); не паскаль (Па), а мегапаскаль (МПа). В связи с этим после ввода очередной исходной величины ( $q := 50$ , например) ведется ее перерасчет – приведение величины к базовой в системе СИ. Так мы поступаем, решая инженерно-техническую задачу, например, в среде табличного процессора Excel, где нет механизма работы с размерными величинами.

<sup>1</sup> Здесь это произведение нужно поделить на КПД насоса. Но мы будем считать идеальным (адиабатным) процесс поднятия давления в насосе (КПД = 1).

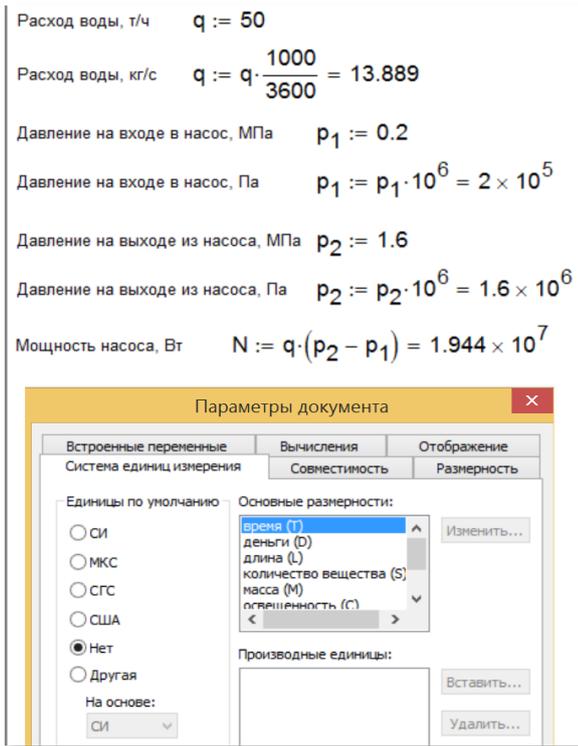


Рис. 2. Попытка расчета мощности насоса в среде Mathcad без задействования механизма единиц измерения (вариант 1)

Альтернативный способ «безразмерного» расчета мощности насоса показан на рис. 3, где переменные хранят величины в небазовых единицах измерения, а коэффициенты пересчета записаны в самой формуле определения мощности насоса.



Рис. 3. Попытка расчета мощности насоса в среде Mathcad без задействования механизма единиц измерения (вариант 2)

В задаче, показанной на рис. 3, названия единиц измерения перенесены из комментариев в сам численный ответ (где для этого в среде Mathcad есть специальный местодержатель). Но при этом сами единицы измерения хранят значение 1 (рис. 2 верхняя часть<sup>2</sup>). Ино-

<sup>2</sup> Операторы ввода в расчет псевдоединиц измерения заключены в область, которую можно свернуть. В таких областях помещают вспомогательные операторы, прямо

гда в такой ситуации единицы измерения записывают комментарием справа от численного ответа. Но это не очень хорошее решение, так как при изменении числа знаков в ответе он может наползать на единицу измерения, записанную в виде комментария.

Любой специалист в любой области науки и техники может привести множество примеров ошибок и казусов, связанных с неправильным оперированием единицами измерения. Отход от ручных расчетов и переход на компьютерные «безразмерные» языки программирования не полностью решил эту проблему.

В расчетах, вернее, в попытках расчета мощности насоса, показанных на рис. 1, 2, допущена грубая ошибка, которую студент может пропустить, а инженерно-технический работник, чувствующий порядок мощности насоса (ватты, киловатты или мегаватты), должен сразу заметить. Дело в том, что в формуле мощности насоса должен стоять объемный ( $m^3/c$ ), а не массовый (кг/с) расход жидкости. Эта ошибка будет сразу высвечена в среде Mathcad, если включить механизм размерных величин (зачернить кружочек с меткой СИ в диалоговом окне, показанном на рис. 1), а числовые константы в исходных данных перемножить на соответствующие единицы измерения (рис. 4).

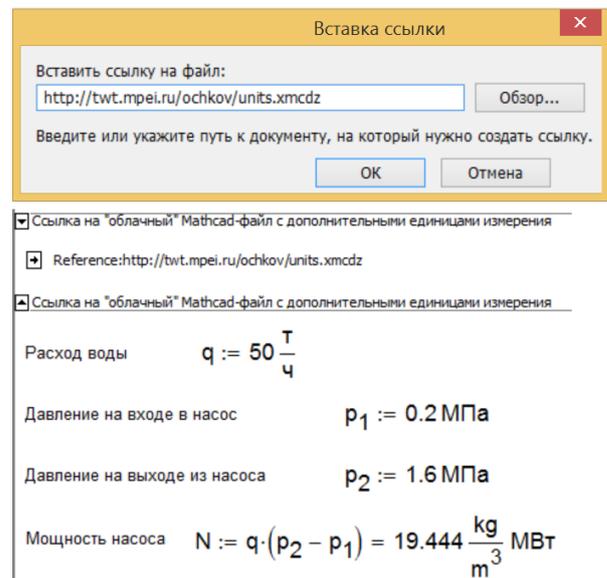


Рис. 4. Расчет мощности насоса: неверный ответ и по значению, и по размерности

В самом начале расчета, показанного на рис. 4, сделана ссылка на «облачный» Mathcad-файл, который хранит пользовательские (в том числе, и с русским написанием) единицы измерения: т, ч, МПа, МВт и т.д.

не относящиеся к расчету. Этот прием будет использован и в других примерах.

На ошибку, допущенную в расчете на рис. 4, указывают лишние единицы измерения в ответе – в мощности насоса. Из этого следует вывод: подключение к расчетам механизма единиц измерения позволит избежать некоторых ошибок в расчетах за счет их блокирования или выдачи неверных единиц измерения в ответе.

Лишние килограммы и кубические метры в ответе по мощности насоса на рис. 3 еще раз указывают на то, что в формуле был задействован не объемный, а массовый расход воды. Чтобы сделать соответствующим перерасчет, нужно знать плотность прокачиваемой жидкости. Можно «спасти» расчеты, показанные на рис. 2–4, если вставить в расчет плотность воды. Обычно эту величину принимают равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Но мы можем поступить по-другому – более точно: учитывать влияние на этот параметр воды ее температуры и давления.

Если к пакету Mathcad подгрузить библиотеку WaterSteamPro [3], обратившись к сайту [www.wsp.ru](http://www.wsp.ru), то в расчетах появятся (станут видны, как говорят программисты) функции, возвращающие теплофизические свойства рабочих тел и теплоносителей в энергетике, в частности, воды и водяного пара (рис. 5).

Расход воды, т/ч  $q := 50$

Давление на входе в насос, МПа  $p_1 := 0.2$

Давление на выходе из насоса, МПа  $p_2 := 1.6$

Температура воды на вход в насос, °C  $t_1 := 70$

Плотность воды на вход в насос,  $\text{кг/м}^3$   $\rho_1 := \text{wspDPT}(p_1 \cdot 10^6, t_1 + 273.15) = 977.823$

Мощность насоса, кВт  $N := \frac{q \cdot \frac{1000}{3600} \cdot (p_2 \cdot 10^6 - p_1 \cdot 10^6)}{\rho_1 \cdot 1000} = 19.885$

Удельная энтропия воды на входе в насос,  $\text{кДж/(кг·K)}$

$$s_1 := \text{wspSPT}(p_1 \cdot 10^6, t_1 + 273.15) \cdot 10^{-3} = 0.9549$$

Удельная энтропия воды на выходе из насоса  $s_2 := s_1$

Температура воды на выходе из насоса, °C

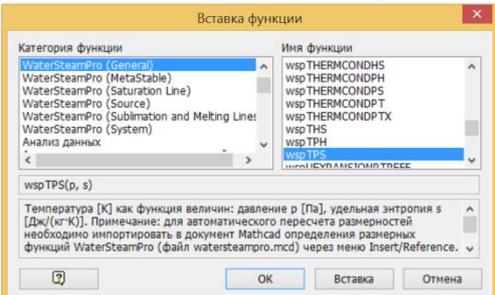
$$t_2 := \text{wspTPS}(p_2 \cdot 10^6, s_2 \cdot 10^3) - 273.15 = 70.068$$


Рис. 5. Расчет мощности насоса с учетом свойств перекачиваемой воды: работа с пакетом WaterSteamPro и базовыми единицами СИ

О том, что библиотека WaterSteamPro подгружена к пакету Mathcad<sup>3</sup>, свидетельству-

<sup>3</sup> Эту библиотеку можно подгружать и к другим программным средам – таблицам Excel, языкам программирования C, Pascal, BASIC и др., к языку программирования инженерных расчетов Matlab и т.д.

ет то, что в списке встроенных функций (рис. 5, нижняя часть) появились соответствующие группы.

В расчете, показанном на рис. 5, учитывается тот факт, что функции библиотеки WaterSteamPro по умолчанию безразмерны и работают с базовыми единицами СИ: с паскалями, а не с мегапаскалями; с секундами, а не с часами; с температурой по шкале Кельвина, а не Цельсия и т.д. Это неудобно, так как заставляет пользователя перегружать расчеты соответствующими пересчетами (рис. 2) или дополнять формулы константами, связанными с пересчетами единиц измерения (рис. 3).

Расчет мощности насоса на рис. 5 дополнен оценкой повышения температуры воды в нем при идеальном процессе поднятия давления. Для этого в расчете, помимо функции wspDPT, возвращающей плотность ( $D$  – density) воды в зависимости от давления ( $P$ ) и температуры ( $T$ ), задействованы еще две функции: wspSPT (удельная энтропия ( $S$ ) воды в зависимости от давления и температуры) и wspTPS (температура воды в зависимости от давления и удельной энтропии – одна из двух обратных функций «основной»<sup>4</sup> функции wspSPT).

Подсказка по функции wspTPS, показанная в диалоговом окне на рис. 5, подсказывает нам стандартный метод работы с единицами измерений при подключении к пакету Mathcad библиотеки WaterSteamPro. Он заключается в том, что вместе с пакетом WaterSteamPro пользователям поставляется Mathcad-файл с именем `watersteampro.xmcd`<sup>5</sup>, который нужно разместить на своем компьютере, на который достаточно сделать ссылку (рис. 6) и который в полном объеме восстанавливает работу функций с префиксом wsp с единицами измерения.

<sup>4</sup> Ее вид задается формуляцией IAPWS-IF97, рекомендованной Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара ([www.iapws.org](http://www.iapws.org)) [4].

<sup>5</sup> В этом файле хранятся операторы переопределения функций из безразмерных в размерные, примерно так:  $\text{wspDPT}(p, T) := \text{wspDPT}(p/\text{Pa}, T/\text{K}) \cdot \text{kg/m}^3$ .

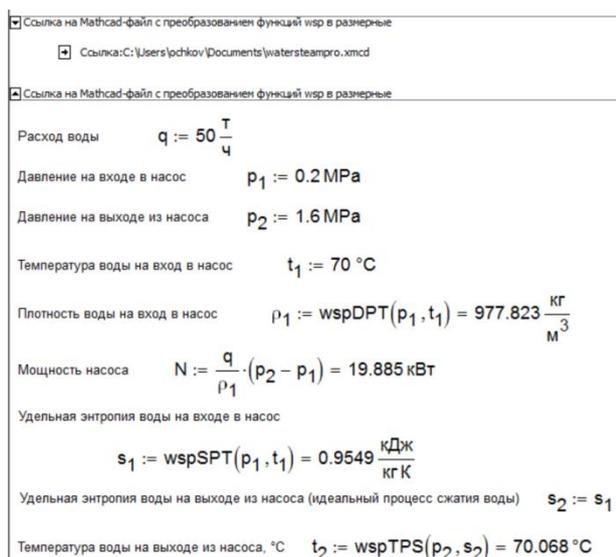


Рис. 6. Расчет мощности насоса в среде Mathcad с пакетом WaterSteamPro и с произвольными единицами измерения

Если же пользователь по ряду причин затрудняется приобрести и зарегистрировать у разработчиков библиотеку WaterSteamPro и подключать ее к расчетной оболочке, а компьютер пользователя подключен к Интернету и ему нужен ограниченный набор функций пакета WaterSteamPro не во всем диапазоне параметров воды и водяного пара, а только для воды, то он в среде Mathcad может сделать видимыми в расчете только нужные функции, сделав на них «облачные»<sup>6</sup> ссылки так, как показано на рис. 7.

Формулу, которую мы использовали для расчета мощности насоса (произведение объемного расхода воды на перепад давления) иногда ошибочно применяют и для компрессоров, предназначенных для повышения давления в сжимаемых рабочих телах – в газах. Для компрессоров нужно использовать не упрощенную формулу (произведение расхода на перепад давления), а формулу, показанную на рис. 8, с определенным интегралом по давлению и с функциями, возвращающими удельный объем среды (wspVPT), удельную энтропию (wspSPT) и температуру (wspTPS). В именах отмеченных функций можно видеть, что является функцией, а что аргументами.

<sup>6</sup> Термин «облачный» означает, что информация хранится не на рабочей станции пользователя и не на сервере его организации, а где-то далеко в «облаках» – на внешнем носителе. Эта относительно новая информационная технология упрощает и облегчает процедуру хранения информации, ее распределение между разными пользователями с разными компьютерами (дома, на работе, в Интернет-кафе и т.д.).

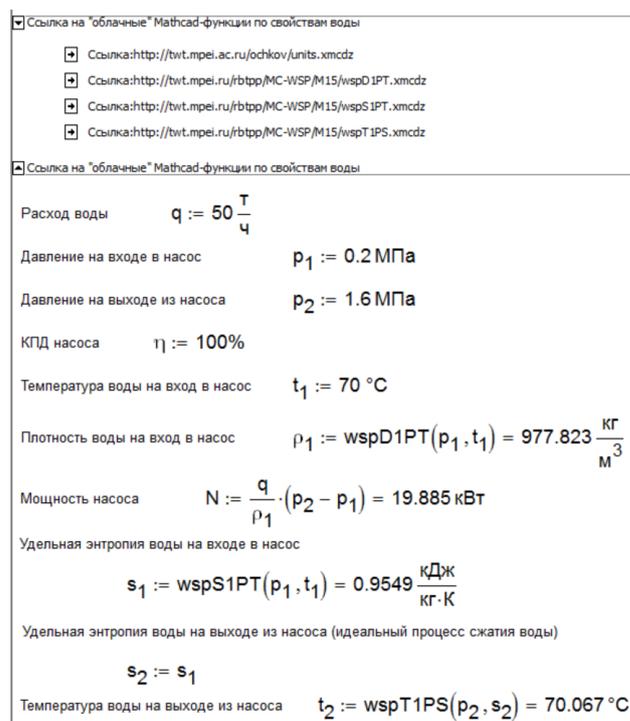


Рис. 7. Расчет параметров насоса со ссылками на три «облачные» функции

Удельный объем в задаче о насосе «смотрится» намного лучше, чем плотность. Дело в том, что проходимость воды через «живое сечение» проточной части насоса (через геометрический размер) лучше связать с «геометрическим» объемным расходом, который логичнее вычислять через удельный объем, а не через плотность.

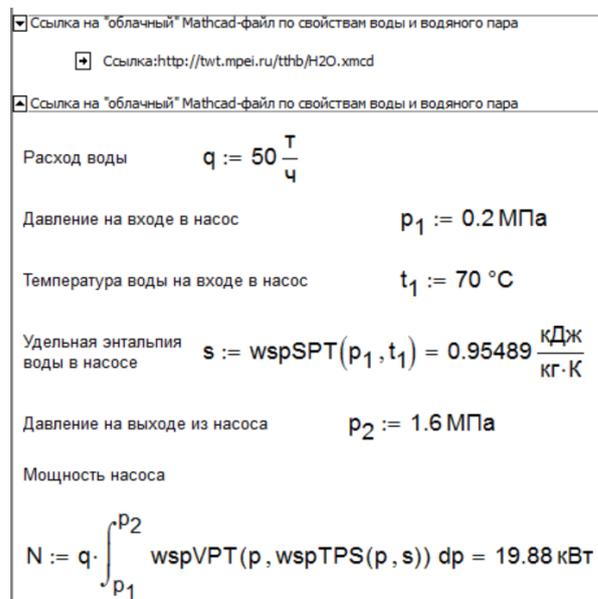


Рис. 8. Расчет мощности насоса: использование формулы с интегралом

В расчете, показанном на рис. 8, дана «облачная» ссылка на Mathcad-файл с именем H2O.xmcd, хранящий большое количество

функций с префиксом *wsp*. Какие это функции, можно узнать, щелкнув два раза по ссылке на этот файл, скачав его из «облака» и открыв на своем компьютере.

Еще один важный нюанс работы с единицами измерения.

В теплотехнических расчетах встречаются величины, которые имеют одну размерность, но разную физическую суть. Если это не учитывать, то в расчетах в среде Mathcad могут возникнуть ошибки, подобные воспроизведенной на рис. 2, 3.

**Пример.** В бинарных термодинамических циклах (в циклах парогазовых энергетических установок (ПГУ) [5, 6]) наряду со многими другими фигурируют такие величины, как удельная энтальпия первого рабочего тела и удельная энтальпия второго рабочего тела. Обе эти величины обычно приводятся в кДж/кг, но килограммы при этом разные. В таких расчетах во избежание ошибок смешения разных физических величин рекомендуется одни килограммы оставлять встроенными, а другим присваивать базовую единицу СИ, не используемую в расчете – канделу, например, *cd*. В этом случае величина *m*, фиксирующая в бинарных циклах отношение расхода одного рабочего тела к расходу другого рабочего тела, будет уже размерной величиной, что исключит некоторые возможные ошибки.

Технология ввода в расчет разных физических величин с одной размерностью показана на рис. 9.

Пользовательские единицы измерения

$\text{кг}_{\text{H}_2\text{O}} := \text{kg}$      $\text{кг}_{\text{газ}} := \text{cd}$      $\text{кДж} := 1000\text{J}$      $\text{ч} := \text{hr}$

Пользовательские единицы измерения

Расход пара через паровую турбину     $q_{\text{пт}} := 500 \frac{\text{кг}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{ч}}$

Удельная работа паровой турбины     $\Delta h_{\text{пт}} := 1300 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}_{\text{H}_2\text{O}}}$

Расход газа через газовую турбину     $q_{\text{гт}} := 1500 \frac{\text{кг}_{\text{газ}}}{\text{ч}}$

Удельная работа газовой турбины     $\Delta h_{\text{гт}} := 690 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}_{\text{газ}}}$

Параметр *m* ПГУ     $m := \frac{q_{\text{гт}}}{q_{\text{пт}}} = 3 \frac{\text{кг}_{\text{газ}}}{\text{кг}_{\text{H}_2\text{O}}}$

Удельная работа парогазовой установки

$\Delta h_{\text{пт}} + \Delta h_{\text{гт}} = \blacksquare$

Значение имеет единицы измерения: масса · время<sup>-2</sup> · длина<sup>2</sup> · освещенность<sup>-1</sup>, а должно иметь единицы измерения: время<sup>-2</sup> · длина<sup>2</sup>.

$\Delta h_{\text{пт}} + m \cdot \Delta h_{\text{гт}} = 3370 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}_{\text{H}_2\text{O}}}$

$\frac{\Delta h_{\text{пт}}}{m} + \Delta h_{\text{гт}} = 1123.3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}_{\text{газ}}}$

Рис. 9. Оценка работы парогазовой установки

На рис. 9 в области «Пользовательские единицы измерения» введены две единицы массы для измерения водяного пара и газа – двух рабочих тел парогазовой установки. Килограммы воды и водяного пара приравнены к встроенной в Mathcad единице массы (*kg*). Килограммы же газа привязаны к единице, которая в данном расчете не используется, – к единице освещенности *cd* (кандела). Кроме того, вводятся русские единицы энергии (кДж) и времени (ч) с привязкой к встроенным (*J* и *hr*).

Далее в расчет (рис. 9) вводятся исходные данные, причем в единицах массового расхода используются килограммы водяного пара и килограммы газа для разных физических величин, имеющих одинаковую размерность массы. Это позволяет иметь в расчете величину *m* (отношение расхода одного рабочего тела к расходу другого рабочего тела) уже не безразмерную, а размерную, что позволяет избежать в расчетах бинарных энергетических циклов некоторых ошибок, одна из которых отображена на рис. 9: если бы мы не ввели две единицы массы для двух рабочих тел, то оператор  $\Delta h_{\text{пт}} + \Delta h_{\text{гт}}$  не прерывался бы сообщением об ошибке, а выдал бы неверный результат. Правильный же результат (удельная работа парогазового цикла) рассчитывается по двум последним операторам.

Некоторую трудность при работе с теплотехническими размерными величинами вызывает температура, вернее – ее представление по различным шкалам. Вот пример типичной ошибки при решении такой простейшей задачи: даны температура теплоносителя на входе в теплообменник (80 градусов) и нагрев теплоносителя в теплообменнике (5 градусов). Найти температуру теплоносителя на выходе из теплообменника. Здесь намеренно не указаны температурные шкалы, так как по умолчанию мы работаем по шкале Цельсия. Ответ получить несложно: 80 + 5 = 85 градусов. Но если мы эту задачу будем решать в среде Mathcad, то может получиться коллизия, зафиксированная на рис. 10.

В расчете на рис. 10 переменной  $\Delta t$  сначала присваивается значение 5°C, которое само по себе несет два смысла: это и температура по шкале Цельсия (285,15 K), и пять градусов Цельсия, которые равны пяти кельвинам. Пакет Mathcad в верхнем операторе суммы (рис. 8) воспринял 5°C как значение температур и выдал ответ, переведенный на шкалу Цельсия, с ошибкой. Такую же ошибку часто совершают и студенты, решая задачу вручную, в среде Excel и даже в среде Mathcad. Чтобы такого не случилось, в среде Mathcad была введена несколько странная единица  $\Delta^\circ\text{C}$ , равная кельвину (рис. 10, нижняя часть расчета). Но если быть предельно кор-

ректным, то при вводе значений разности температур лучше использовать кельвины.

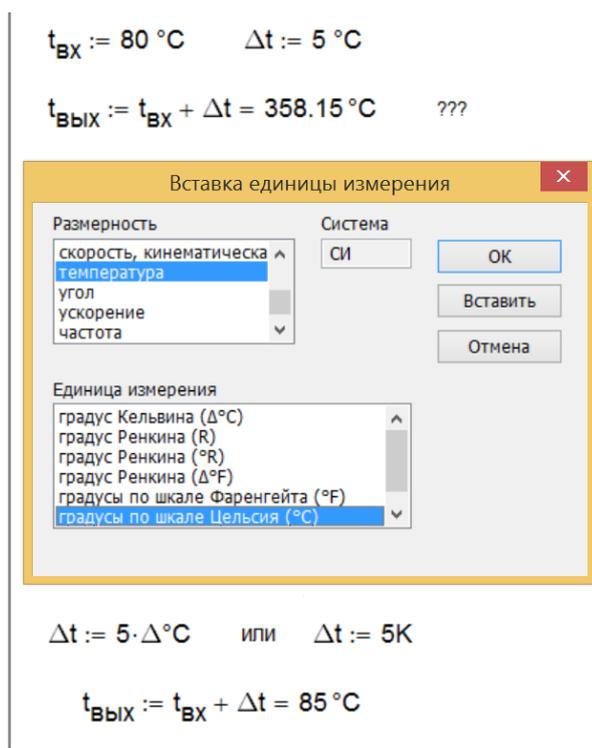


Рис. 10. Расчет температуры

В старых справочниках можно встретить единицу теплопроводности kW/(м·°C). В этой записи при переносе ее в среду Mathcad необходимо использовать не °C, а K или Δ°C.

Вводя в расчет размерную величину, мы сначала записываем числовое значение, а потом единицу измерения. А что стоит между числом и единицей? Обычно там расположен невидимый или видимый знак умножения. Но при использовании относительных шкал измерения там присутствует некая функциональная зависимость. Такое имеет место при вводе в Mathcad температуры по шкале Цельсия, например:  $t := 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ . В выражении  $50 \text{ } ^\circ\text{C}$  идентификатор  $^\circ\text{C}$  – это не константа (единица измерения), а функция вида  $^\circ\text{C}(t) := (t + 273.15) \cdot \text{K}$ , которая вызывается в виде постфиксного оператора  $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ , где 50 – это операнд, а  $^\circ\text{C}$  – имя (символ) оператора. Задавать функцию  $^\circ\text{C}(t)$  приходилось в ранних версиях Mathcad, где были только кельвины и градусы Ренкина. В современных версиях Mathcad ввод температуры по относительным шкалам Цельсия или Фаренгейта автоматизирован и ведется через диалоговое окно, показанное на рис. 10. Некоторую путаницу при работе с температурой можно видеть в некоторых расчетах, где под температуру по шкале Кельвина выделяется одна переменная (например, T), а под ту же температуру, но по шкале Цельсия, – другая (t или θ). Работа в среде Mathcad убирает эту раздвоенность.

Можно упомянуть одну инженерную ошибку, связанную уже не с самими единицами измерения, а с относительными шкалами измерения. Строили мост через Рейн. С одного берега это делали немцы, а с другого – швейцарцы. Когда пролеты моста стали соединяться на середине реки, то оказалось, что разница в их высотах составила чуть ли не полметра. Причина ошибки оказалась в том, что в Германии строительный стандарт нулевой высоты – это средний уровень Северного моря, а в Швейцарии – Средиземного.

Этот строительный казус показывает, что относительная шкала может быть не только у температуры, но и у длины (высоты). На электростанциях оборудование расположено на разных уровнях (строительно-монтажных отметках). Иногда в чертежах на импортное оборудование можно видеть: начало отсчета – уровень моря. Расчет, показанный на рис. 11, учитывает эти нюансы.

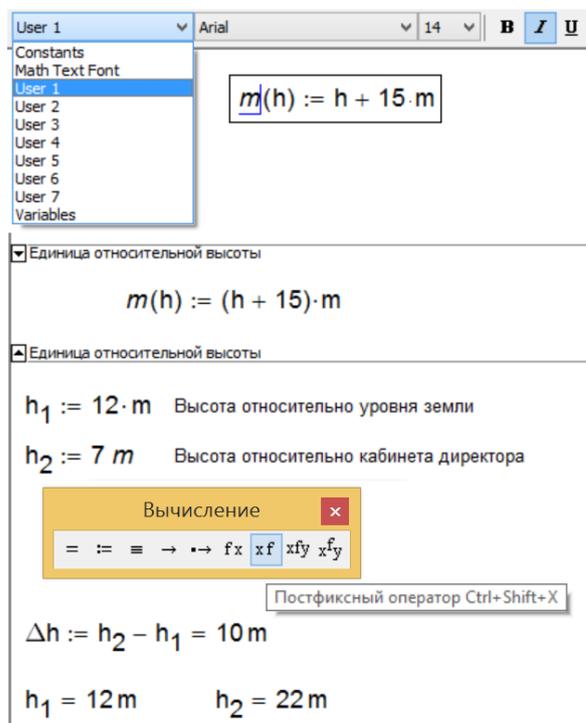


Рис. 11. Абсолютная и относительная высота

**Задача.** Есть данные о двух объектах с указанием их отметки по высоте от уровня земли и от кабинета директора электростанции (15 м от нулевой отметки). Найти перепад высот этих объектов.

Решение см. на рис. 11, где задействованы два идентификатора с именем m (метры). Один идентификатор имеет стиль Variables, а второй – User1. Чтобы их не путать, второй идентификатор (символ постфиксного оператора) прописан курсивом.

Перепады высот необходимо строго учитывать в расчетах при проектировании, например, тепловых сетей и других водоводов.

И последнее, но очень важное при работе с размерными величинами. При выполнении расчетов на компьютере результаты вычислений отображаются на экране монитора с количеством разрядов, принятым в настройке по умолчанию. Например, при расчете в среде Mathcad отображается три разряда числа справа от десятичного разделителя. Такое количество разрядов может создавать иллюзию высокой точности результатов. При расчетах с малыми величинами, наоборот, требуется увеличивать разрядность отображения результатов вычислений или использовать кратные единицы измерения (например, не вольты, а милливольты). Поэтому перед расчетчиком стоит задача правильно назначить разрядность промежуточных и конечных чисел в экранных записях и в расчетно-пояснительной записке. При этом вычисления в процессоре компьютера выполняются с полным количеством разрядов числа (15 разрядов в Mathcad). Эти знания необходимы каждому студенту технического вуза. Многие курсовые работы студенты сдают с численными записями, в которых количество значащих цифр (разрядов) числа содержит 4–6 лишних сомнительных разрядов. Еще актуальнее это требование при выполнении теплотехнических расчетов в условиях эксплуатации на ТЭС, когда исходные данные – это результаты измерений. Например, предел погрешности определения энтальпии свежего пара перед турбиной составляет  $\pm 10$  кДж/кг ( $\pm 2,4$  ккал/кг). Погрешность определения энтальпии пара регенеративных отборов турбины составляет 5–5,5 кДж/кг (большее значение для отборов с более высоким давлением). Поэтому правильная запись величины энтальпии должна содержать не более двух сомнительных разрядов на промежуточных этапах теплотехнического расчета (3482 кДж/кг).

Выполним приближенную оценку погрешности определения расхода греющего пара на сетевой подогреватель в целях правильной записи результата расчета. Исходные данные содержат пределы абсолютной погрешности параметров:

- расход воды через сетевой подогреватель  $D_{св} = (985 \pm 15)$  кг/с; энтальпия воды на входе в сетевой подогреватель и его выходе  $h_{вх} = (273,5 \pm 1,2)$  кДж/кг и  $h_{вых} = (353,4 \pm 1,5)$  кДж/кг; энтальпия греющего пара  $h_n = (2542 \pm 5)$  кДж/кг; энтальпия конденсата греющего пара (дренажа)  $h_{др} = (382,8 \pm 1,7)$  кДж/кг.

Расчет расхода пара по уравнению теплового баланса (без учета потерь теплоты рассеиванием) в электронной таблице Excel отображает следующий результат:

$$D_n = \frac{D_{св}(h_{вых} - h_{вх})}{h_n - h_{др}} = 36,4493794.$$

Получим приближенные оценки погрешностей математических операций:

- абсолютная погрешность разности в числителе, кДж/кг:

$$\Delta(h_{вых} - h_{вх}) = \Delta h_{вых} + \Delta h_{вх} = 1,5 + 1,2 = 2,7;$$

- абсолютная погрешность разности в знаменателе, кДж/кг:

$$\Delta(h_n - h_{др}) = \Delta h_n + \Delta h_{др} = 5 + 1,7 = 6,7;$$

- относительная погрешность расхода греющего пара (погрешность операций умножения и деления), о. е.:

$$\delta D_n = \frac{\Delta D_{св}}{D_{св}} + \frac{\Delta(h_{вых} - h_{вх})}{h_{вых} - h_{вх}} + \frac{\Delta(h_n - h_{др})}{h_n - h_{др}} = 0,052;$$

- абсолютная погрешность расхода греющего пара, кг/с:

$$\Delta D_n = \delta D_n \cdot D_n = 0,052 \cdot 36,4493794 = 1,89987534 \approx 1,9.$$

При этом действует следующее правило: значащая цифра числа верная, если абсолютная погрешность этого числа не превышает пяти единиц разряда, стоящего справа от этой цифры.

Сделаем промежуточную запись результата для последующего анализа:

$$D_n = 36,4493794 \pm 1,9.$$

Видим, что старший разряд погрешности расхода греющего пара располагается в первом разряде слева от десятичного разделителя и не превышает пяти единиц этого разряда. Следовательно, в результате первый разряд слева от разделителя сомнительный (все разряды правее его также сомнительные), а второй разряд – верный. Поэтому на последнем этапе расчета конечная запись результата расчета должна быть следующей (с одним сомнительным разрядом):

$$D_n = 36 \text{ кг/с.}$$

Мы намеренно не приводим этот расчет расхода пара в Mathcad, а призываем читателя сделать это самостоятельно в качестве упражнения и еще раз почувствовать удобство работы с размерными величинами в среде этого физико-математического пакета.

Нюансам использования размерных величин в теплотехнических расчетах посвящена отдельная глава учебного пособия [7], где, в частности, описаны следующие приемы: работа с децибелами; использование в расчетах эмпирических и псевдоэмпирических формул; единицы измерения при интерполяции, аппроксимации и экстраполяции табличных данных разной конфигурации; единицы измерения на графиках; символьные (аналитические) преобразования выражений с размерными величинами и др.

## Заключение

Работа с физико-математическими пакетами при расчетах учебного и производственного плана позволяет, с одной стороны, исключить из расчетов некоторые ошибки, а с другой – лучше понимать физическую (теплотехническую) сущность расчетов, не отвлекаясь на дополнительные пересчеты единиц измерения.

## Список литературы

1. **Очков В.Ф.** Физические и экономические величины в Mathcad и Maple. (Сер. «Диалог с компьютером»). – М.: Финансы и статистика, 2002 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forword\\_book.htm](http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forword_book.htm)
2. **Дьяконов В.П.** Новые информационные технологии: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2009. – 640 с. (доп. издание).
3. **Очков В.Ф., Орлов К.А.** Теплотехнические расчеты: от встроенных функций к облачным // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1. – С. 5–10.
4. **IF-97 IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam** // International Association for the Properties of Water and Steam / Electric Power Research Institute; Executive Secretary R.B. Dooley. – PaloAlto. CA 94304, USA.
5. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009.
6. **Александров А.А.** Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 160 с.

**Очков Валерий Федорович,**  
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”»,  
доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,  
телефон (495) 362-71-71,  
e-mail: ochkov@twt.mpei.ac.ru

**Орлов Константин Александрович,**  
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,  
телефон (495) 362-71-71,  
e-mail: orlov@twt.mpei.ac.ru

**Дорохов Евгений Викторович,**  
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,  
телефон (495) 362-71-71,  
e-mail: dor-evgeny@yandex.ru

**Лавыгин Василий Михайлович,**  
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”»,  
кандидат технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,  
телефон (495) 362-71-71,  
e-mail: LavyginVM@mpei.ru

7. **Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет** / под общ. ред. В.Ф. Очкова. – 2-е изд. – СПб.: Изд-во БХВ-Петербург, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI/index.html>

## References

1. Ochkov, V.F. *Fizicheskie i ekonomicheskie velichiny v Mathcad i Maple. (Seriya «Dialog s komp'yuterom»)* [Physical and economic values in Mathcad and Maple]. Moscow, Finansy i statistika, 2002. Available at: [http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forword\\_book.htm](http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Units/Forword_book.htm)
2. D'yakov, V.P. *Novye informatsionnye tekhnologii* [New IT: a study guide]. Moscow, Solon-Press, 2009. 640 p.
3. Ochkov, V.F., Orlov, K.A. *Teplotekhnicheskie raschety: ot vstroennykh funktsiy k oblachnym* [Thermal engineering calculation: from built-in to cloud functions]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 1, pp. 5–10.
4. **IF-97 IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam.** International Association for the Properties of Water and Steam. Executive. Electric Power Research Institute. PaloAlto. CA 94304, USA.
5. Tsanev, S.V., Burov, V.D., Remezov, A.N. *Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostantsiy* [Gas and combined cycle units of power plants]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2009.
6. Aleksandrov, A.A. *Termodinamicheskie osnovy tsiklov teploenergeticheskikh ustanovok* [Thermodynamic bases of thermal engineering units]. Moscow, Izdatel'stvo MEI, 2004. 160 p.
7. *Teplotekhnicheskie etyudy s Excel, Mathcad i Internet* [Thermal engineering studies with Excel, Mathcad and Internet]. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo BKhV-Peterburg, 2014. Available at: <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI/index.html>