

УДК 621.368

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

Г.А. ПИКИНА, Т.С. НГУЕН

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ
«Модели тепловых процессов»**

Методическое пособие
по курсу
«МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ»
для студентов,
обучающихся по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Утверждено учебным управлением МЭИ

Подготовлено на кафедре АСУ ТП

Рецензент — канд. техн. наук, доцент В.Р. Сабанин

Пикина Г.А.

П

Методические указания по выполнению курсовой работы «Модели тепловых процессов». Г.А. Пикина, Т.С. Нгуен — М.: Изд-во МЭИ, 2016, 18 с.

Методические указания содержат задание, варианты исходных данных, общие требования и рекомендации по выполнению курсовой работы. В рамках задания выполняются расчеты характеристик поверхности теплообмена с использованием готовой Visual C# программы кафедральной вычислительной лаборатории и математического пакета Mathcad.

Дано описание Visual C# программы расчета статических и динамических характеристик поверхностей теплообмена. В программе предусмотрена возможность использования моделей с распределенными или сосредоточенными параметрами применительно к различным реальным поверхностям ТЭС и АЭС – конвективным с однофазными теплоносителями, конвективным с наружным теплоносителем на линии насыщения и радиационным.

Приведены формулы для расчета статических и комплексных частотных характеристик для моделей с сосредоточенными и распределенными параметрами как отдельных физических сред, так и теплообменника в целом.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». Компьютерная программа ориентирована на выполнение лабораторных и курсовых работ учебного процесса, но может быть использована инженерами и исследователями.

Предисловие

Целью курсовой работы является изучение основ математического моделирования технологических объектов, методов описания системой нелинейных дифференциальных уравнений, способов упрощения моделей и методов их решения.

В результате выполнения курсовой работы обучающиеся должны демонстрировать следующие результаты образования:

- **знать** методы математического описания динамических систем, способы получения моделей различного приближения и решения системы дифференциальных уравнений, в частности, в виде динамических и статических характеристик;
- **уметь** применять методы современной теории математического моделирования в прикладных задачах управления технологическими объектами ТЭС и АЭС;
- **владеть** современными методами получения статических и динамических характеристик и техникой применения математических пакетов для их расчетов.

1. Задание на работу

1. Составить **структурную схему** математической модели заданного объекта [1, § 5.1; Д1].
2. Представить **таблицу исходных данных**.
3. Записать **исходные нелинейные уравнения динамики** [1, § 5.1; Д1] для:
 - а) основного теплоносителя (внутри труб);
 - б) теплопередающей стенки;
 - в) наружного теплоносителя.
4. Перечислить принятые **допущения при выводе** уравнений п. 3. [1, § 1.4].
5. Записать уравнение **энергии основного теплоносителя**
 - а) в линейном распределенном приближении;
 - б) в линейном точечном приближении.Получить передаточные функции и КЧХ моделей основного теплоносителя по заданным преподавателем каналам. Составить программу и выполнить расчеты на ЭВМ [1, §§ 2.1, 2.2].
6. Выполнить аналогичное п. 5 задание для **теплопередающей стенки** труб [1, § 3.3; Д3].
7. Получить из исходной системы уравнений **модель статики объекта**. Перечислить дополнительно принятые упрощения [1, § 5.3, § 5.4—5.6]. Составить программу и рассчитать на ЭВМ распределение по длине параметров по заданным преподавателем каналам. Выполнить аналогичные расчеты с помощью программного обеспечения КВЛ АСУ ТП. Сравнить результаты. Сделать выводы.
8. Записать модель **заданного объекта в целом в линейном распределенном приближении** при согласованных с преподавателем допущениях [1, § 5.4—5.6; Д1; Д2]. Получить передаточные функции и выражения для КЧХ заданных каналов. Составить программу и рассчитать на ЭВМ частотные характеристики каналов. Построить годографы КЧХ. Выполнить аналогичные расчеты с помощью программного обеспечения КВЛ АСУ ТП. Сравнить результаты расчетов. Сделать выводы.

9. Получить математическую *модель объекта в точечном линейном приближении* [1, §§ 5.4—5.6; Д1; Д2]. Составить программу и рассчитать на ЭВМ КЧХ точечной модели аналогичных п. 8 каналов. Построить годографы КЧХ. Выполнить сравнение динамики распределенной и точечной модели. Сделать выводы.

2. Варианты исходных данных курсовой работы

Варианты исходных данных курсовой работы для аналитического моделирования и расчета характеристик реальных объектов тепловых и атомных станций можно получить после запуска программы РТО, установленной в кафедральной вычислительной лаборатории. Номер варианта задается преподавателем.

3. Описание С# программы «РТО»

Основное назначение программы «Расчет характеристик поверхностей теплообмена» — поддержка лабораторных и курсовых работ учебного курса «Моделирование систем управления», поставленного на кафедре АСУ ТП Московского энергетического института [5].

База данных содержит 40 вариантов численных значений технологических и конструктивных параметров теплообменных устройств барабанного котла БКЗ-320, прямоточного котла ТГМП-314, парогенераторов энергоблоков ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Наряду с этим не исключается возможность выполнения расчетов с оригинальными данными пользователя. Введенные пользователем данные сохраняются в базе данных с возможностью последующего обращения к ним. Предусмотрено форматирование исходных данных и для многовариантных исследовательских расчетов.

Разработка проведена в среде программирования Microsoft Visual 2010 С# [Д5, Д6]. На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма.

Перечислим основные возможности, реализованные в программе.

1. Расчет характеристик теплообменников всех типов: конвективного с однофазными теплоносителями прямоточного (или противоточного) типа; конвективного с наружным теплоносителем на линии насыщения; радиационного.
2. Расчет статических характеристик с использованием нелинейной модели с распределенными параметрами всех физических сред (двух теплоносителей и теплопередающей стенки труб в случае конвективного теплообменника, РП-РП-РП модель) или с распределенными параметрами теплоносителей и точечной моделью труб (РП-СП-РП) [1].

На каждом шаге расчета распределения температур сред по длине осуществляется обращение к модулю термодинамических свойств воды и водяного пара в целях определения изменяющихся по длине значений теплоемкости c_p и плотности ρ .

3. При расчете противоточного теплообменника предусмотрена реализация итерационной процедуры. Расчет динамических (комплексных частотных) характеристик каналов тепловых процессов относительно всех возможных входов и выходов. В этом случае используются два вида линейных моделей — с распределенными параметрами только теплоносителя внутри труб (СП-СП-РП модель) и с сосредоточенными параметрами всех сред (СП-СП-СП) [1].

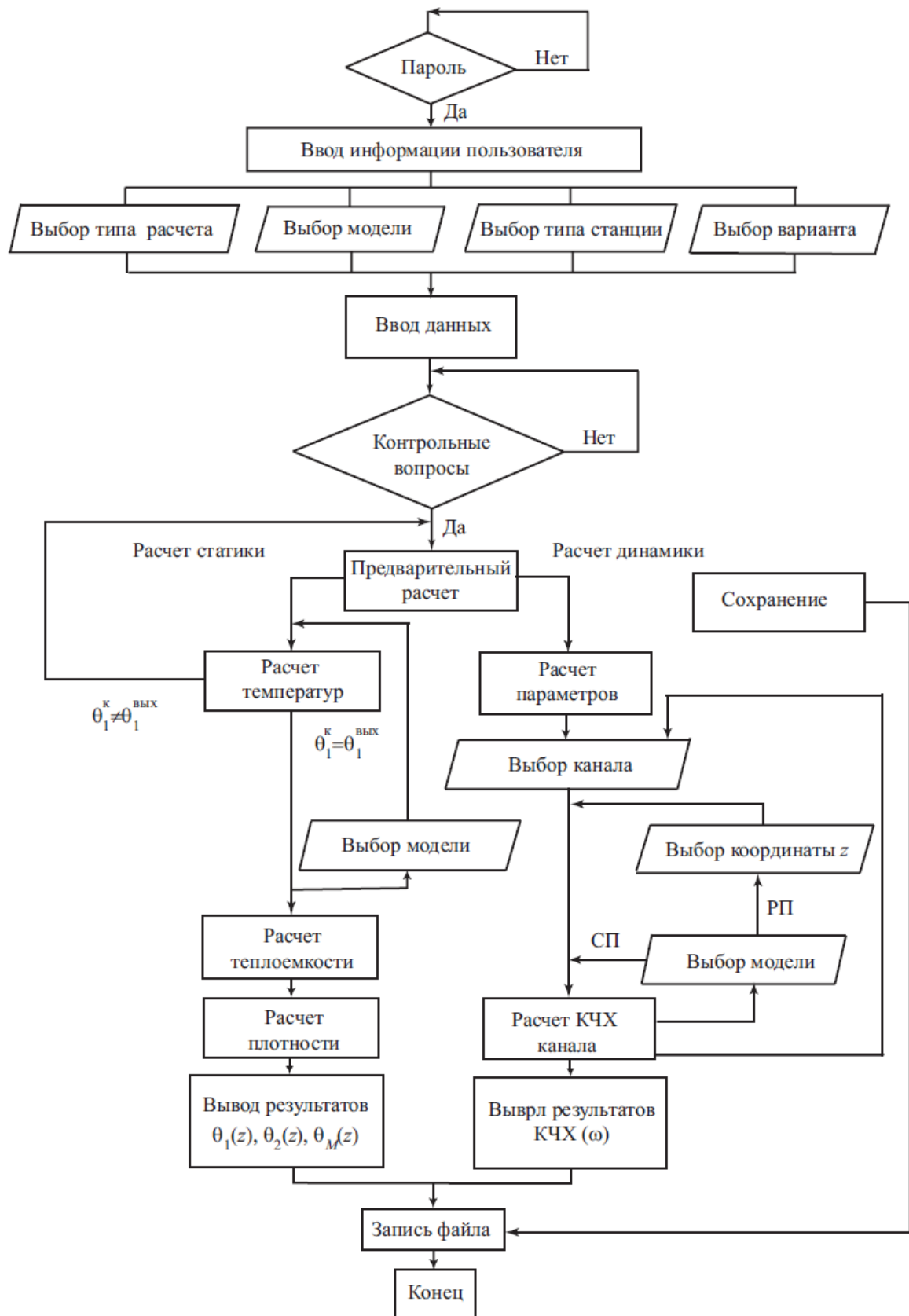


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы

4. Контрольные вопросы для проверки знаний студента и принятия решения о допуске к выполнению работы.
5. Вывод промежуточных и конечных результатов на экран и организация диалога с пользователем.
6. Запись результатов в файл по адресу, указанному пользователем.

3.1. Информационное представление и управление программой

Обычно запуск программы и управления ее работой выполняется с помощью мыши. Однако загрузку и управление программой можно проводить и **без помощи мыши** нажатием соответствующих клавиш клавиатуры. Таблица соответствия клавиш и функций возникает на экране, когда пользователь щелкает **правую кнопку мыши**.

Функции клавиш клавиатуры

Клавиши	Функции	Кнопки
<i>Работа в программе РТО</i>		
Enter	Перейти в следующее окно	Дальше
Esc	Выйти из программы	Выход
Ctrl+S	Сохранить окно в виде фотографии	Сохранить
Ctrl+I	Увеличить масштаб графика КЧХ	Увеличить
Ctrl+O	Уменьшить масштаб графика КЧХ	Уменьшить
Ctrl+W	Добавить контрольную точку КЧХ	—
Ctrl+E	Убрать старые графики	Убрать
Shift+Backspace	Вернуть в предыдущее окно	Вернуться
Shift+Enter	Рассчитать или обновить окно	Обновить
Ctrl+Tab	Переход между страницами	—
Ctrl+D	Проверить ответ	Проверка
F1	Сигнальные графы	—
Ctrl+F	Изменение языка интерфейса	—
Ctrl+ Enter	В окно «Выбор режима»	—
<i>Работа в Windows</i>		
Ctrl+C	Копировать текст	—
Ctrl+V	Вставить текст	—
Ctrl+X	Вырезать текст	—
Ctrl+A	Выделить весь текст	—
Ctrl+Z	Вернуться к предыдущей операции	—

В первом окне «Выбор режима работы», показанном на рис. 2, выполняется:

- регистрация пользователя;
- выбор типа электростанции (ТЭС или АЭС);
- выбор номера варианта задания;
- выбор типа расчета (расчет статических или комплексных частотных характеристик поверхности);
- выбор типа моделей (с распределенными РП или сосредоточенными СП параметрами).

Кнопки управления расположены в нижнем ряду.

Выбор режима работы

Введите Вашу информацию

Фамилия:

Имя:

Отчество:

Группа:

Выбор типа расчёта

Тепловые процессы: Статика

Тепловые процессы: математические модели теплообменников

Гидравлические процессы: математические модели гидродинамики

Выбор типа станции

Тепловая электростанция

Выбор типа моделей

РН-модель (распределенная модель)

Выбор варианта

Вариант 1: ТГМП-314. Конвективный пароперегреватель: Противоток

Вариант 2: ТГМП-314. Потолочный пароперегреватель

Вариант 3: ТГМП-314. Нижняя радиационная часть

Вариант 4: ТГМП-314. Верхняя радиационная часть

Вариант 5: БКЗ-320. Конвективный пароперегреватель: Противоток

Вариант 6: БКЗ-320. Конвективный пароперегреватель: Прямоток

Вариант 7: БКЗ-320. Водяной экономайзер: Противоток

Вариант 8: ТГМП-314. Конвективный пароперегреватель: Противоток

27 January, 2016

Вернуться Сохранить Далее Выход

Рис. 2. Окно «Выбор режима работы»

Кнопка «Сохранить» автоматически сохраняет в памяти компьютера всю информацию окна «Выбор режима работы». Кнопка «Вернуться» возвращает в начало к запросу «Введите пароль». Кнопка «Далее» (или клавиши Enter) возникает окно с исходными данными выбранного варианта (рис. 3).

Данные

Тип Вашего котла, тип поверхности и схема движения теплоносителей

Вариант 1: ТГМП-314. Конвективный пароперегреватель: Противоток

Данные для наружного теплоносителя

Расход D_1 270 кг/с

Плотность ρ_1 0.35 кг/м³

Теплоемкость c_{p1} 1.36 кДж/(кг·К)

Температура на входе $\theta_1^{вх}$ 850 Цельсия

Кэфф. теплоотдачи α_1 0.088 кВт/(м²·К)

Данные для радиационного потока

Плотность рад. потока q_p 0 кВт/м²

Кэфф. эфф. поверхности $k^{эф}$ 1

Данные для внутреннего теплоносителя

Расход D_2 254 кг/с

Плотность ρ_2 53.3 кг/м³

Теплоемкость c_{p2} 4.65 кДж/(кг·К)

Температура на входе $\theta_2^н$ 448 Цельсия

Температура на выходе $\theta_2^к$ 545 Цельсия

Кэфф. теплоотдачи α_2 4.3 кВт/(м²·К)

Начальное давление $P_2^н$ 26.5 МПа

Конечное давление $P_2^к$ 25.5 МПа

Данные для труб

Число труб N 380 штук

Длина одной трубы L 50 м

Наружный диаметр d_n 32 мм

Толщина стенки трубы δ 3 мм

Теплоемкость металла c_m 0.49 кДж/(кг·К)

Кэфф. теплопроводности λ 0.016 кДж/(м·К)

Плотность металла ρ_m 8000 кг/м³

Схема движ. теплоносителей -1

Вернуться Сохранить Далее Выход

Рис. 3. Окно «Ваши данные»

Значения плотности ρ_2 и теплоемкости c_{p2} паро-водяного теплоносителя внутри труб заданы здесь ориентировочно (выделены красным цветом), так как они зависят от температуры и давления, изменяющихся по ходу движения теплоносителя, и будут уточняться в результате статического расчета.

Активацией окон размерностей можно ввести данные с любой общепринятой размерностью; введенное численное значение будет автоматически пересчитано в стандартную систему единиц СИ.

3.2. Расчет статических характеристик

Перед началом расчета статики предлагается ответить на контрольный вопрос, построенный таким образом, что для разных типов поверхностей теплообмена будет разный ответ. Для этого в меню окна «Контрольные вопросы» (рис. 4) следует выбрать позицию «ТО-статика».

Рис. 4. Окно «Контрольные вопросы»

В окне рис. 5 выводятся предварительно рассчитанные параметры сред. В том случае, когда схема движения теплоносителей противоточная, здесь нужно ввести ориентировочные значения объема V_1 и длины хода L_1 наружного теплоносителя. Кроме того, необходимо задавать неизвестную начальную (выходную) температуру наружного теплоносителя $\theta_1^H = \theta_1^{\text{вых}}$ для организации итерационной процедуры расчета.

Рис. 5. Окно «Предварительный расчет»

Итерационный расчет противоточных теплообменников проводится следующим образом:

1. В окне вывода на экран данных рис. 3 в разделе «Данные для наружного теплоносителя» запоминаем значение температуры на входе $\theta_1^{вх} = \theta_1^к$.
2. В поле для ввода начальной температуры окна «Предварительный расчет» задаем ориентировочное значение температуры наружного потока на выходе $\theta_1^н$.
3. Нажимаем кнопку «Дальше» и по таблице рассчитанного распределения температур рис. 6 сравниваем заданную входную температуру $\theta_1^{вх}$ с рассчитанной температурой $\theta_1^к$ при $z = 1$. Если $\theta_1^к$ оказалась больше (меньше) заданной, то возвращаемся на шаг назад и вводим новое, меньшее (большее) значение начальной температуры $\theta_1^н$. Повторять шаги 2 – 3 до тех пор, пока заданная и рассчитанная температуры наружного теплоносителя на входе практически не совпадут.

В результате статических расчетов получаем следующие графики:

- распределение по длине трубы температур внутреннего теплоносителя, наружного теплоносителя и внутренней поверхности стенки (рис. 6);
- распределение по длине трубы теплоемкости внутреннего теплоносителя (рис. 7);
- распределение по длине трубы плотности внутреннего теплоносителя (рис. 8);
- распределение температуры стенки труб по радиусу (рис. 6).

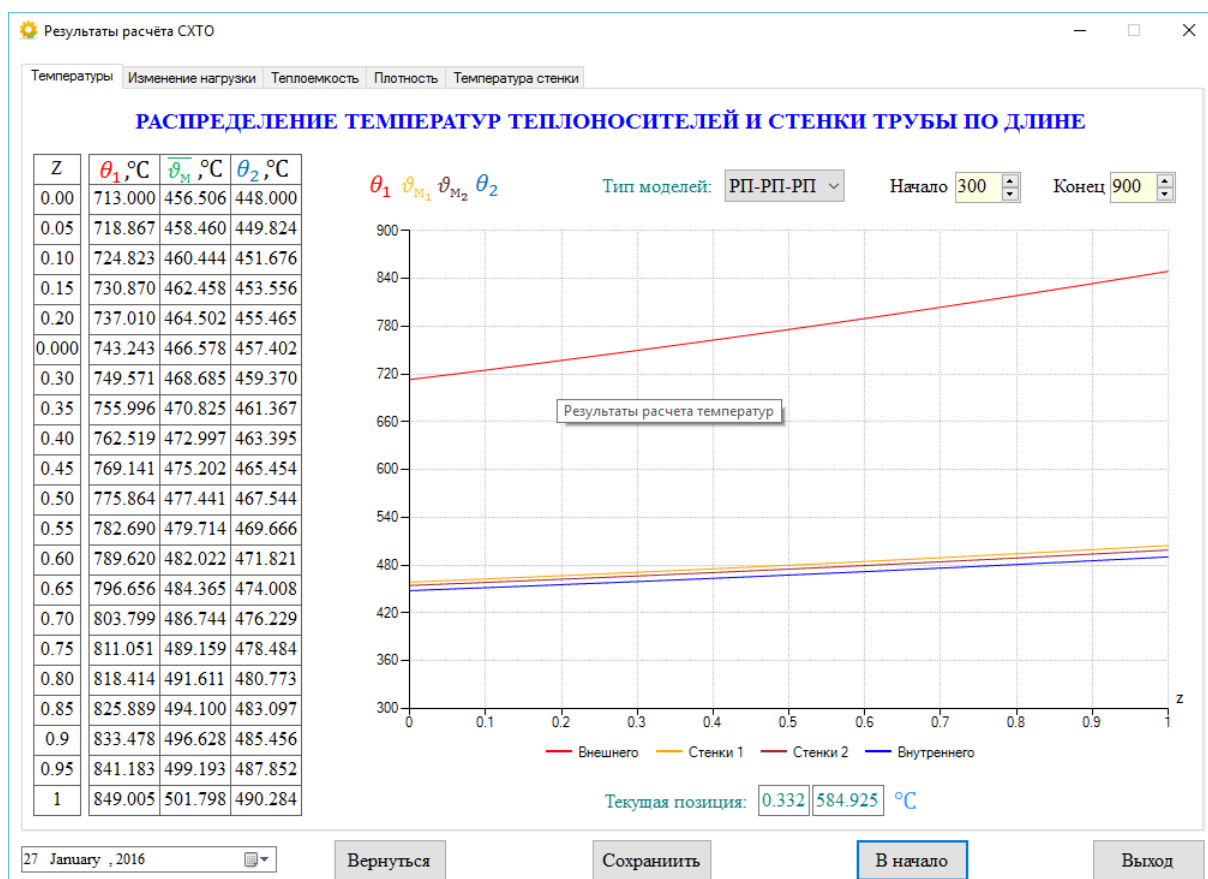


Рис. 6. Распределение по длине трубы температур внутреннего теплоносителя, наружного теплоносителя и внутренней поверхности стенки для РП-модели

В окне рис. 6 верхней кнопкой можно изменить тип модели теплопередающей стенки с распределенной на сосредоточенную, а в окнах «Текущая позиция» определить координаты любой точки на графиках с помощью движения по нему стрелкой мыши.

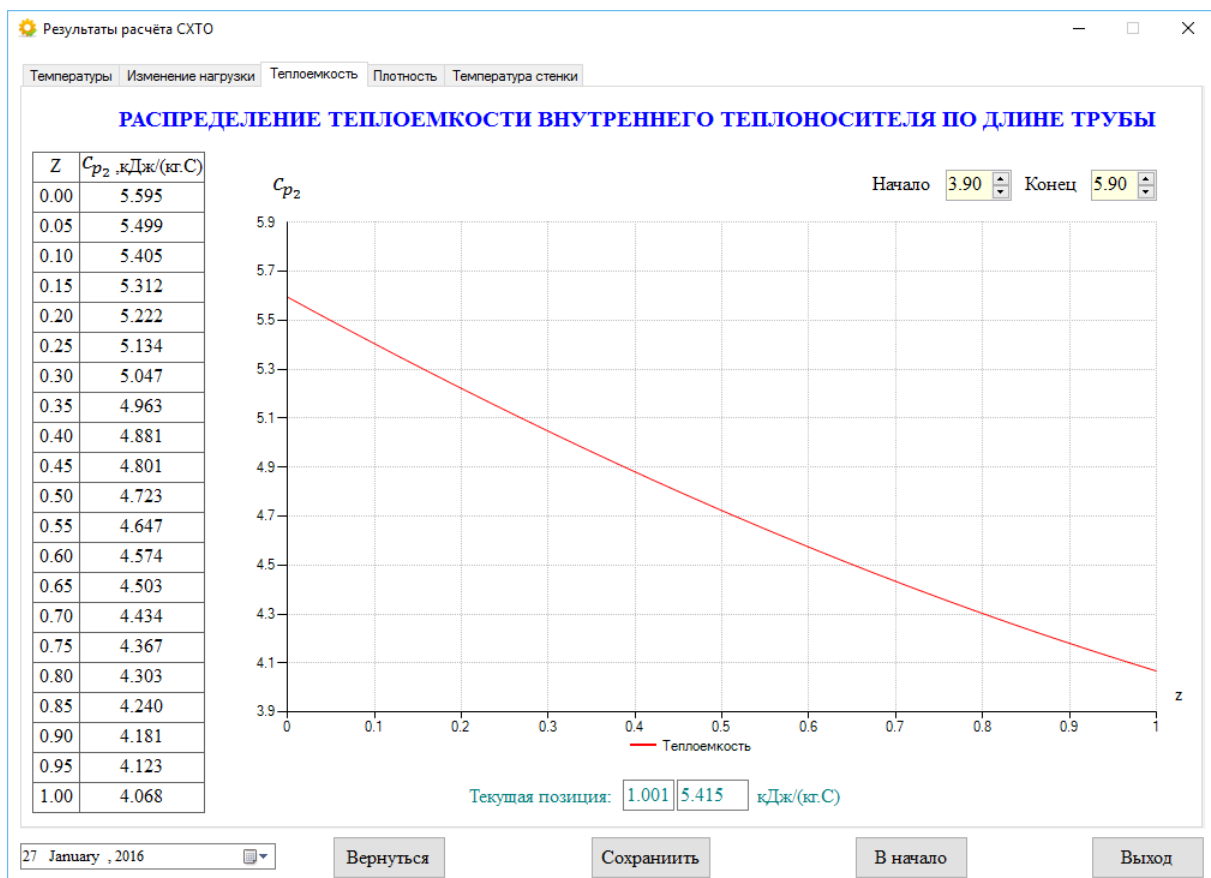


Рис. 7. Распределение по длине трубы теплоемкости внутреннего теплоносителя для РП-модели

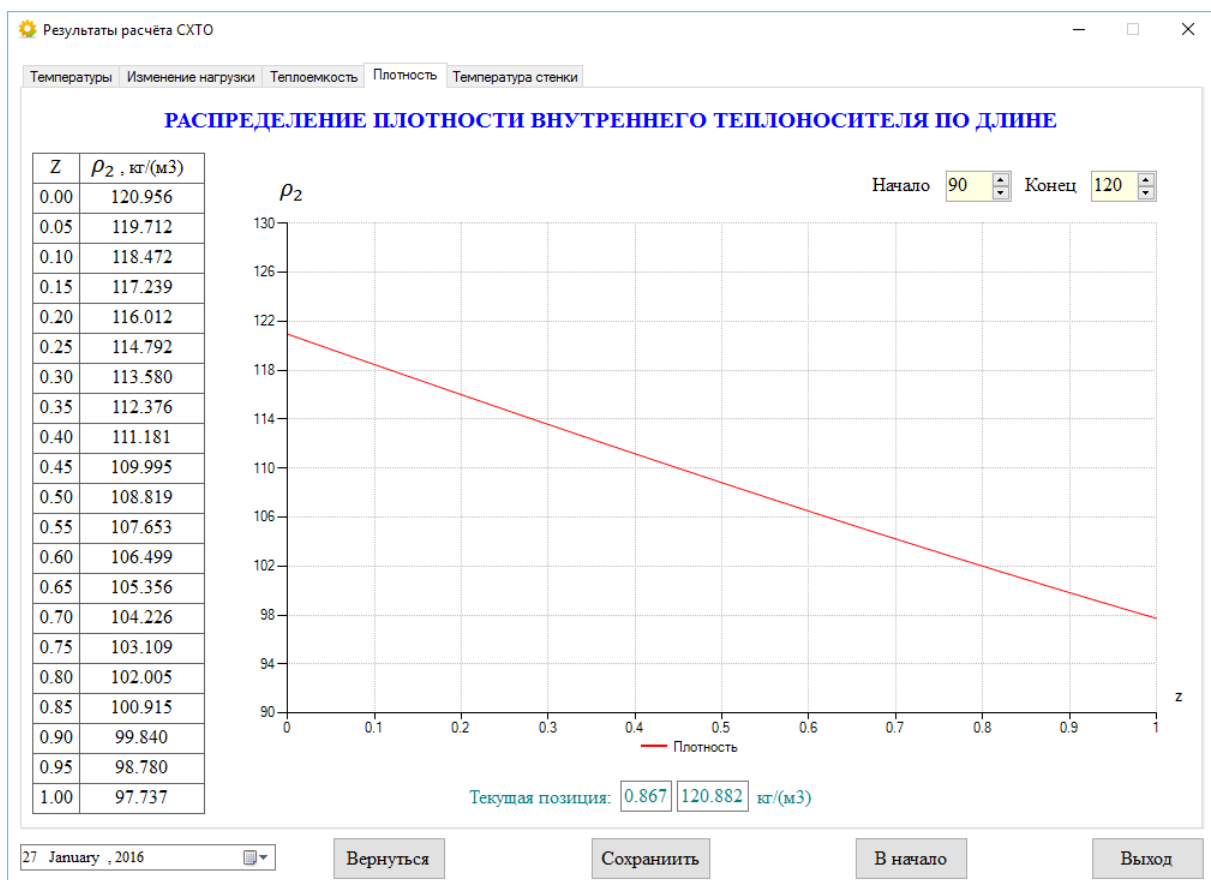


Рис. 8. Распределение по длине трубы плотности внутреннего теплоносителя для РП-модели

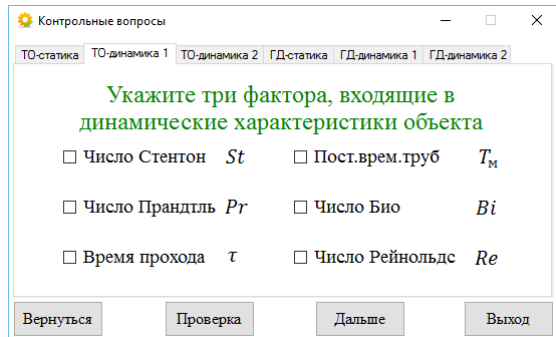
Важная информация:

При расчете статических характеристик программа на каждом шаге делает обращения к термодинамическим таблицам воды и водяного пара, что позволяет отразить нелинейность модели и получить распределение плотности и теплоемкости внутреннего теплоносителя по длине. Эти результаты следует использовать для коррекции заданных в таблице рис. 3 исходных значений плотности и теплоемкости.

3.3. Расчет комплексных частотных характеристик

После ввода своих или получения готовых исходных данных предлагается ответить на два контрольных вопроса:

а) Первый вопрос:



б) Второй вопрос:

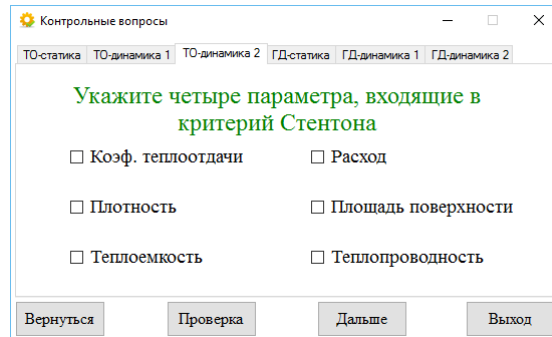
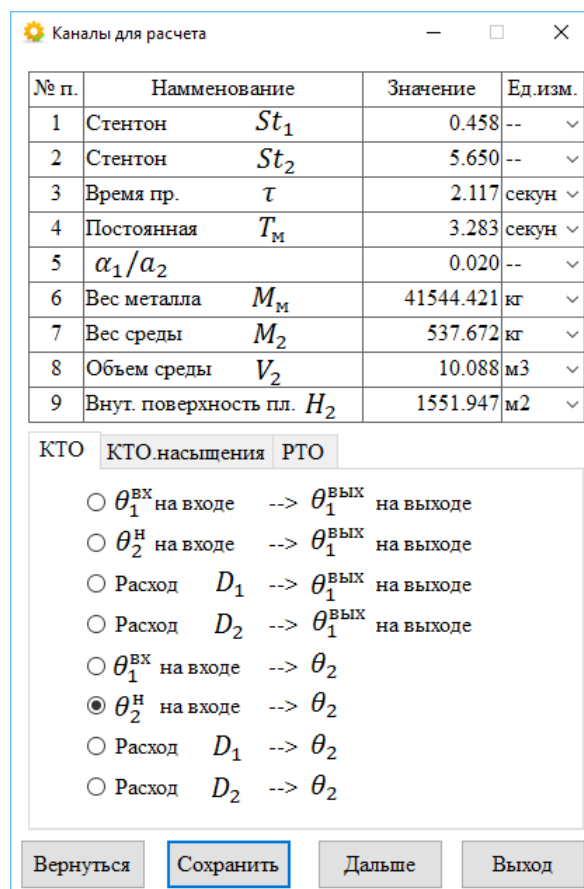


Рис. 9. Контрольные вопросы «ТО-динамика 1» и «ТО-динамика 2»

В следующем окне рис. 10 выводятся обобщенные параметры поверхности, выбирается из меню тип теплообменника (рис. 10, 11 или 12) и рассчитываемый канал.



№ п.	Наименование	Значение	Ед. изм.
1	Стентон St_1	0.458	--
2	Стентон St_2	5.650	--
3	Время пр. τ	2.117	секун
4	Постоянная T_m	3.283	секун
5	α_1/a_2	0.020	--
6	Вес металла M_m	41544.421	кг
7	Вес среды M_2	537.672	кг
8	Объем среды V_2	10.088	м3
9	Внут. поверхность пл. H_2	1551.947	м2

КТО КТО.насыщения РТО

☐ $\theta_1^{вх}$ на входе --> $\theta_1^{вых}$ на выходе

☐ θ_2^H на входе --> $\theta_1^{вых}$ на выходе

☐ Расход D_1 --> $\theta_1^{вых}$ на выходе

☐ Расход D_2 --> $\theta_1^{вых}$ на выходе

☐ $\theta_1^{вх}$ на входе --> θ_2

☒ θ_2^H на входе --> θ_2

☐ Расход D_1 --> θ_2

☐ Расход D_2 --> θ_2

Рис. 10. Окно «Обобщенные параметры» для КТО



Рис. 11. Позиция меню для КТО с насыщением

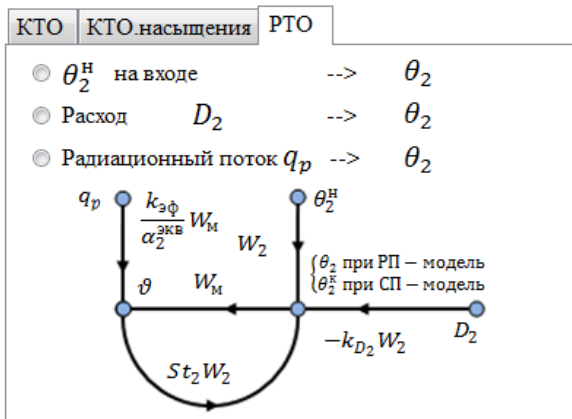


Рис. 12. Позиция меню для РТО

В окне также существует выбираемая система размерностей.

После нажатия клавиши «Дальше» в последующем окне строится комплексная частотная характеристика для рассчитываемого канала (рис. 13).

В этом окне пользователь задаёт частоту среза и параметры осей координат.

При нажатии на клавишу «Обновить» увеличивается масштаб изображения (для просмотра КЧХ в области высоких частот), при повторном нажатии он увеличивается ещё больше, а при третьем – возвращается к исходному виду.

Масштабирование предусмотрено для того, чтобы убедиться, что выполненный расчёт согласуется с теорией, в соответствии с которой КЧХ по температурному каналу для внутреннего теплоносителя стремится к окружности с радиусом e^{-St_2} , а КЧХ по другим каналам могут иметь петли.

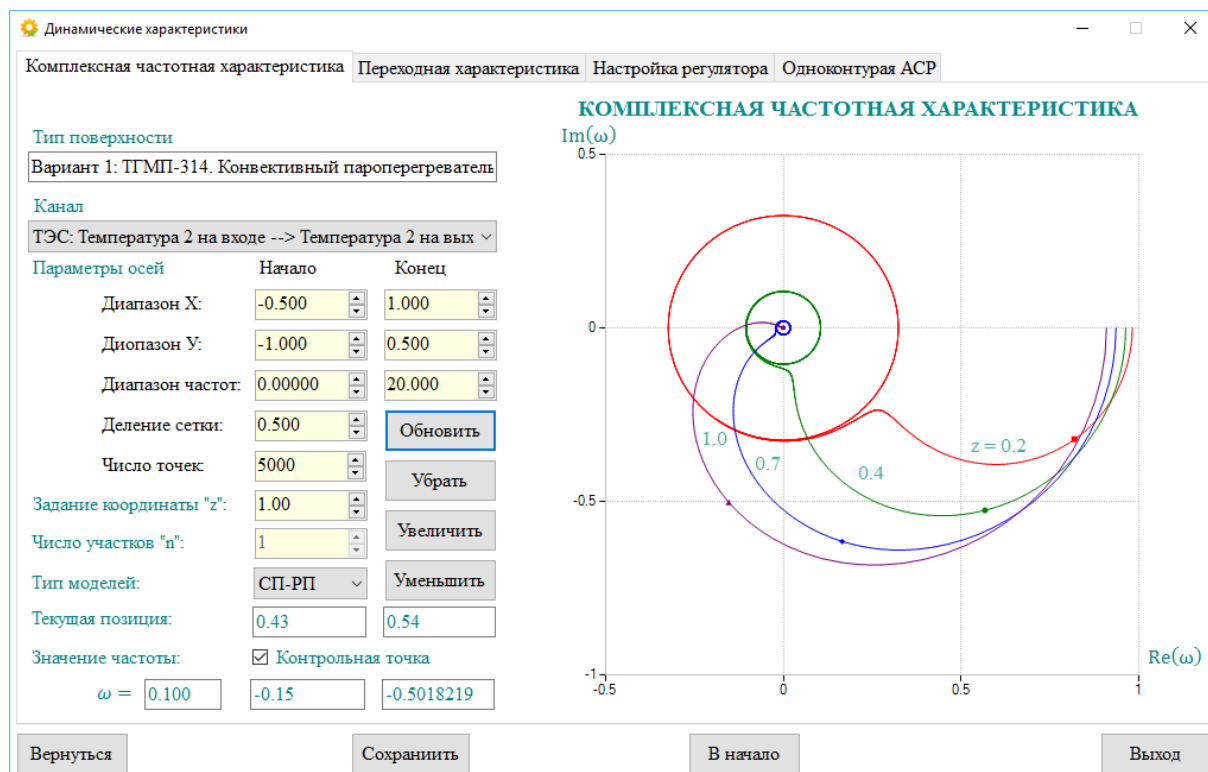


Рис. 13. Окно «Динамические характеристики». Комплексная частотная характеристика.

С помощью двух кнопок «Увеличить» и «Уменьшить» легко изменяется масштаб отображения КЧХ.

В поле «Задание координаты z » вводится значение сечения, для которого кнопкой «Обновить» выполняется расчет. Для разных значений координаты длины отображается множество годографов КЧХ. Кнопкой «Убрать» все предыдущие расчеты на графике стираются, и остается один годограф последнего расчета.

В активном поле «Тип моделей» можно сделать переключение расчета с РП моделей на СП модели каналов.

Предусмотрено отображение начальной точки, «текущей позиции» маркера, задание и отображение на годографах контрольной точки.

В этом окне можно сделать переключение на другую позицию верхнего меню — откроется окно с переходной характеристикой рассчитываемой модели выбранного канала, как это показано на рис. 14.

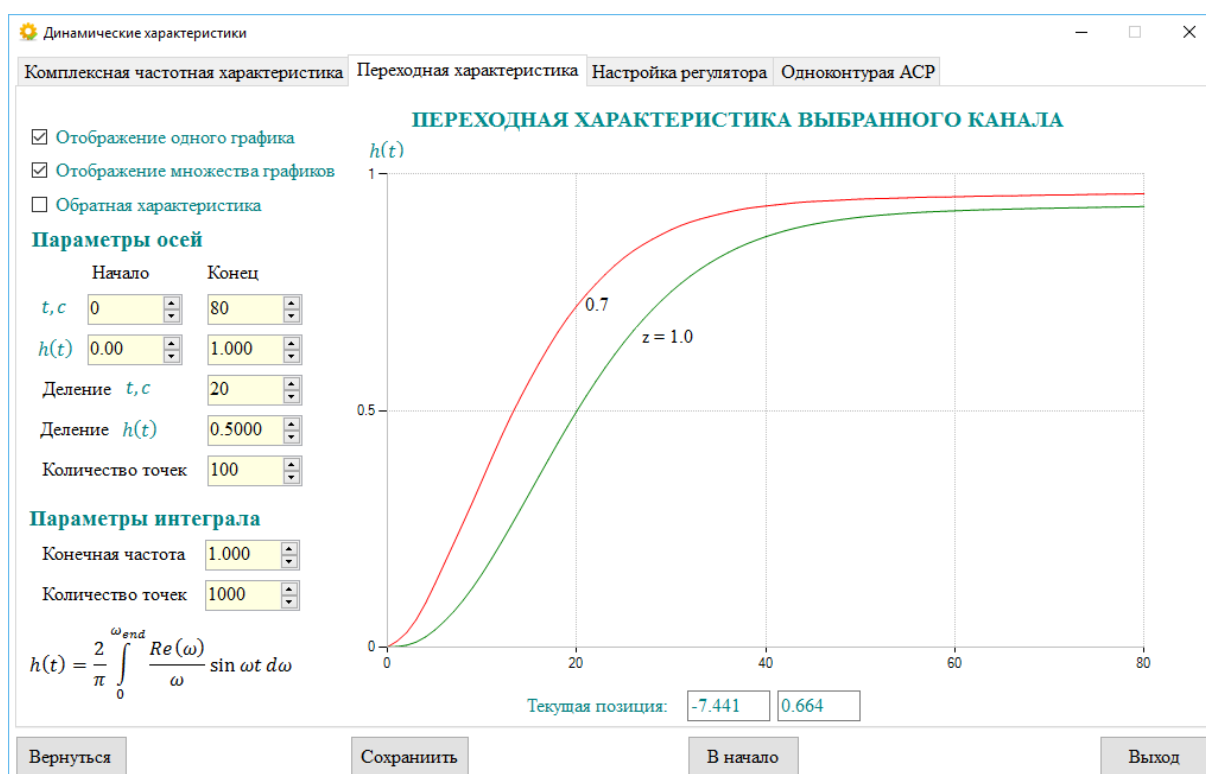


Рис. 14. Окно «Динамические характеристики». Переходная характеристика.

Здесь кроме возможности настройки параметров отображения графиков предусмотрена возможность настройка параметров формулы обратного преобразования Фурье — конечной частоты (верхнего предела интегрирования) и количества рассчитываемых точек.

По окончании расчетов частотных характеристик клавишей «F1» клавиатуры можно вызвать добавочное окно «Help» с изображением сигнальных графов и таблиц передаточных функций всех каналов, по которым были проведены расчеты КЧХ. На рис. 15 дано окно для модели с распределенными параметрами конвективного теплообменника с однофазными теплоносителями. В меню даны все типы теплообменников и виды моделей (РП или СП).

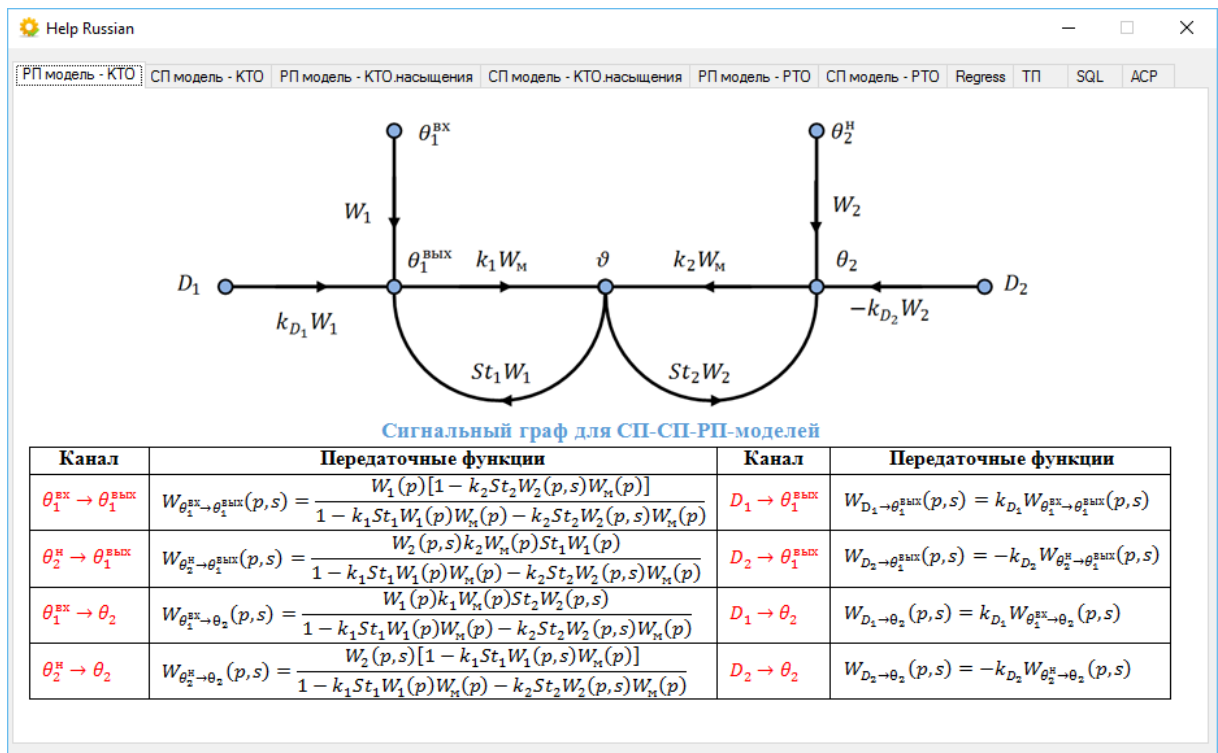


Рис. 15. Окно «Help»

4. Задание на расчеты в среде MathCAD

В соответствии с п.п. 5—9 задания на курсовую работу предлагается выполнить расчеты статического распределения температур внутреннего и наружного теплоносителя по длине трубы и комплексных частотных характеристик по каналу «температура на входе θ^H — температура на выходе θ^K ».

Полученные результаты сравнить с аналогичными расчетами по программе «РТО» и дать объяснение имеющимся различиям.

4.1. Расчет комплексных частотных характеристик потока

Структура передаточных функций тепловых процессов отдельно взятого потока не зависит от типа теплообменной поверхности, а определяется лишь видом принятой модели:

а) **РП модель**, (2.7), стр. 37 [1]:

$$: \quad W_{\theta^H \theta^K}(p) = e^{-St} e^{-p\tau}; \quad \text{где} \quad St = \frac{\alpha H}{c_p D}; \quad \tau = \frac{M}{D} = \frac{V\rho}{D}.$$

б) **СП модель**, (2.12), стр. 44 [1]:

$$W_{\theta^H \theta^K}(p) = \frac{1}{\tau p + 1 + St}.$$

4.2. Расчет комплексных частотных характеристик стенки

Структура передаточных функций тепловых процессов отдельно взятой стенки труб зависит как от типа теплообменной поверхности, так и от вида принятой модели:

а) РП модель

- для РТО, (3.19), стр. 74 [1]:

$$W_{\theta_2 \vartheta}(p, y) = \frac{\vartheta(p, y)}{\theta_2(p)} = \frac{ch[(\delta - y)\sqrt{p/a}]}{ch(\delta\sqrt{p/a}) + \frac{\lambda r}{\alpha_2} sh(\delta\sqrt{p/a})}, \text{ где } r = \sqrt{p/a}, \quad a = \lambda/(\rho_M c_M);$$

- для КТО, (3.20), стр. 767 [1]:

$$W_{\theta_2 \vartheta}(p, y) = \frac{\vartheta(p, y)}{\theta_2(p)} = \frac{\frac{\lambda r}{\alpha_1} ch[r(\delta - y)] + sh[r(\delta - y)]}{\left(\frac{\lambda r}{\alpha_1} + \frac{\lambda r}{\alpha_2}\right) ch(r\delta) + \left(\frac{\lambda r}{\alpha_1} \frac{\lambda r}{\alpha_2} + 1\right) sh(r\delta)},$$

где $r = \sqrt{p/a}$, $a = \lambda/(\rho_M c_M)$.

б) СП модель

- для РТО — (3.23), стр. 78 [1]:

$$W_{\theta_2 \vartheta}(p) = \frac{1}{T_M p + 1}, \text{ где } T_M = \frac{\rho_M c_M \delta}{\alpha_2};$$

- для КТО — (3.25), стр. 79 [1]:

$$W_{\theta_2 \vartheta}(p) = \frac{k_2}{T_M p + 1}, \text{ где } k_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad T_M = \frac{\rho_M c_M \delta}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

4.3. Расчет статистики теплообменной поверхности:

- для КТО — (5.27) и (5.28), стр. 133 [1]:

$$\begin{aligned} \theta_2(z) &= \frac{b}{a+b} \left[1 - e^{-(a+b)z} \right] \theta_1^H + \frac{a}{a+b} \left[1 + \frac{b}{a} e^{-(a+b)z} \right] \theta_2^H; \\ \theta_1(z) &= \frac{b}{a+b} \left[1 + \frac{a}{b} e^{-(a+b)z} \right] \theta_1^H + \frac{a}{a+b} \left[1 - e^{-(a+b)z} \right] \theta_2^H; \end{aligned}$$

где $a = (-1)^H \frac{KH}{c_{P1} D_1}$; $b = \frac{KH}{c_{P2} D_2}$; $K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} \right)^{-1}$.

- для КТО с наружным теплоносителем на линии насыщения — (5.32), стр. 137 [1]:

$$\theta_2(z) = \left[1 - e^{-bz} \right] \theta_{1s} + e^{-bz} \theta_2^H, \text{ где } b = \frac{KH}{c_{P2} D_2}; \quad K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} \right)^{-1};$$

- для РТО (5.34) и (5.35), стр. 140, 141 [1]:

$$\theta_2(z) = \theta_2^H + \frac{k^{\varphi H}}{D_2 c_{P2}} q_p z; \quad \theta_1(z) = \theta_1^H - (-1)^H \frac{k^{\varphi H}}{D_1 c_{P1}} q_p z.$$

4.4. Расчет КЧХ теплообменной поверхности

а) РП модель

- для КТО, (5.40), стр. 147 [1]:

$$W_{\theta_2^H \theta_2^K}(p) = e^{-\left[\tau_2 p + St_2 - \frac{B(p)}{A(p)}\right]},$$

где $A(p) = 1 - k_1 St_1 W_1(p) W_M(p)$; $B(p) = k_2 St_2 W_M(p)$; $k_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$; $k_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$;

$$T_M = \frac{\rho_M c_M \delta}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad W_1(p, s) = \frac{1}{\tau_1 p + 1 + St_1}, \quad W_M(p) = \frac{1}{T_M p + 1};$$

- для КТО с наружным теплоносителем на линии насыщения, (5.45), стр. 157 [1]:

$$W_{\theta_2^H \theta_2^K}(p) = e^{-[\tau_2 p + St_2 (1 - k_2 W_M)]},$$

где $k_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$; $T_M = \frac{\rho_M c_M \delta}{\alpha_1 + \alpha_2}$; $W_M(p) = \frac{1}{T_M p + 1}$;

- для РТО, (5.50), стр. 162 [1]:

$$W_{\theta_2^H \theta_2^K}(p) = e^{-[\tau_2 p + St_2 (1 - W_M)]},$$

$$T_M = \frac{\rho_M c_M \delta}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad W_M(p) = \frac{1}{T_M p + 1}.$$

б) СП модель

- для КТО, (5.43), стр. 154 [1]:

$$W_{\theta_2^H \theta_2^K}(p) = \frac{b_1 p^2 + b_2 p + b_3}{a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4},$$

где

$$\begin{aligned} b_1 &= \tau_1 T_M; \quad b_2 = \tau_1 + T_M (1 + St_1); \quad b_3 = 1 + k_2 St_1; \\ a_1 &= \tau_1 \tau_2 T_M; \quad a_2 = \tau_1 \tau_2 + (1 + St_2) \tau_1 T_M + (1 + St_1) \tau_2 T_M; \\ a_3 &= [(1 + St_2) T_M + \tau_2] + k_1 St_2 \tau_1 + k_2 St_1 \tau_2 + St_1 (1 + St_2) T_M; \\ a_4 &= 1 + k_1 St_2 + k_2 St_1; \end{aligned}$$

- для КТО с наружным теплоносителем на линии насыщения, стр. 160 [1]:

$$W_{\theta_2^H \theta_2^K}(p) = \frac{T_M p + 1}{\tau_2 T_M p^2 + [\tau_2 + T_M (1 + St_2)] p + (1 + k_1 St_2)}.$$

- для РТО, стр. 166 [1]:

$$W_{\theta_2^H \theta_2^K}(p) = \frac{T_M p + 1}{\tau_2 T_M p^2 + [\tau_2 + T_M (1 + St_2)] p + 1}.$$

5. Контрольные вопросы

1. Назовите три типа поверхностей нагрева агрегатов тепловых и атомных станций.
2. Какие допущения относительно радиационного потока позволяют сделать декомпозицию математической модели и упростить ее решение?
3. Какая технологическая особенность парогенераторов ВВЭР позволяет заметно упростить математическую модель тепловых процессов? В чем состоит это упрощение?
4. В чем принципиальное отличие моделей с распределенными (РП) и сосредоточенными (СП) параметрами?
5. Как отличаются статические математические модели от динамических моделей?
6. Перечислите основные технологические и термодинамические параметры теплоносителей, формирующие нелинейные свойства поверхности нагрева.
7. Как получить из нелинейной модели линейную?
8. Как получить из системы уравнений динамической модели модель статического приближения?
9. Каким образом осуществляется переход от РП модели к СП модели?
10. Как из формул распределения температур сред теплообменника с РП моделью плоской стенки получить решение для точечной модели и РП модели цилиндрической стенки?

Список литературы

а) Основной:

1. **Пикина Г.А.** Математические модели технологических объектов: Учебное пособие для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 300 с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ. 2007. 400 с.
3. **Пикина Г.А., Нгуен Т.С.** Программа расчета статических и динамических характеристик теплообмена оборудования тепловых и атомных электростанций // Вестник МЭИ, № 1, 2015. С. 46—50.

б) Дополнительный:

- Д1. **Аветисян А.Р., Пащенко А.Ф., Пащенко Ф.Ф., Пикина Г.А., Филиппов Г.А.** Теплогидравлические модели оборудования электрических станций. М.: Физматлит, 2013. 435 с.
- Д2. **Пащенко Ф.Ф., Пикина Г.А.** Основы моделирования энергетических объектов. М.: Физматлит, 2011. 464 с.
- Д3. **Плютинский В.И.** Статические и динамические характеристики ядерных энергетических установок: учебное пособие. М.: МЭИ. 1980. 89 с.
- Д4. **Плютинский В.И., Погорелов В.И.** Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС. М.: Энергоатомиздат. 1983. 295 с.
- Д5. **CodeProject** [Электрон. ресурс]. <http://www.codeproject.com/?cat=4> (дата обращения 14.12.2015).
- Д6. **Каталог API (Microsoft)** и справочных материалов [Электрон. ресурс]. <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/> (дата обращения 14.12.2015)

Содержание

Предисловие	3
1. Задание на работу.....	3
2. Варианты исходных данных курсовой работы	4
3. Описание С# программы «РТО»	4
3.1. Информационное представление и управление программой	6
3.2. Расчет статических характеристик.....	8
3.3. Расчет комплексных частотных характеристик.....	11
4. Задание на расчеты в среде MathCAD	14
4.1. Расчет комплексных частотных характеристик потока	14
4.2. Расчет комплексных частотных характеристик стенки	15
4.3. Расчет статики теплообменной поверхности:	15
4.4. Расчет КЧХ теплообменной поверхности	16
Список литературы	17
Содержание.....	18

Учебное издание

Пикина Галина Алексеевна, **Нгуен** Тиен Санг

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ «МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ»

Методическое пособие по курсу «Моделирование объектов управления» для студентов, обучающихся по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Редактор издательства

Темплан издания МЭИ 2016, метод.

Формат

Физ. печ.л. 1,1

Тираж 100

Подписано в печать

Изд. №

Заказ

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., дом 14
Отпечатано в ПЦ МЭИ, 11250, Москва, Красноказарменная ул., дом 13