

УДК 004.942

## Модели теплообмена в комплексе МДС

Трудоношин Владимир Анатольевич

trudonoshinva@bmstu.ru

Георгиев Александр Федорович

a.georgiev@bmstu.ru

Оглоблин Дмитрий Игоревич

ogldi@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*В статье рассмотрены вопросы 1D моделирования теплообмена при проектировании технических систем. Приведена эквивалентная схема трубопровода с пояснениями физического смысла элементов. Проведено сравнение результатов моделирования для вертикально расположенной пластины и теплообменника «труба в трубе», полученных в отечественном программном комплексе МДС (Моделирование динамических систем) и в зарубежном программном комплексе Amesim.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, эквивалентная схема, теплоотдача, теплообмен, программный комплекс моделирование динамических систем, МДС, 1D, сравнение

**Введение.** При моделировании многих технических объектов и изделий, особенно содержащих гидравлические и пневматические подсистемы, режимы функционирования определяются не только механическими нагрузками, но и температурными ограничениями, поэтому необходимо учитывать взаимовлияние этих подсистем с системой обеспечения теплового режима (тепловой подсистемой). В системах обеспечения теплового режима довольно часто используется устройство для нагрева или охлаждения сред путем передачи тепла между двумя соосными трубами: одна находится внутри другой. Этот тип теплообменника хорошо подходит для вязких, загрязненных или волокнистых жидкостей, а также для работы при больших перепадах давления, и находит широкое применение в нефтехимической, химической, пищевой и других отраслях промышленности.

При решении задач с нагревом (охлаждением) необходимо учитывать также влияние окружающей среды. При моделировании взаимодействия с окружающей газовой средой, определяющим видом передачи энергии является конвективный теплообмен.

**Математическая модель конвективного теплообмена.** Рассмотрим модель конвективной теплоотдачи с поверхности твердого тела в газовую среду. При моделировании тепловых подсистем фазовыми переменными являются температура (переменная типа потенциала) и тепловой поток (переменная типа потока). Математическая модель элемента тепловой подсистемы должна быть записана с использованием этих переменных. Основным законом, описывающим теплоотдачу, является закон охлаждения Ньютона

$$Q = \alpha * (T_{\text{ст}} - T_{\text{газа}}) * S,$$

где  $Q$  — тепловой поток;  $T_{\text{ст}}$  — температура стенки;  $T_{\text{газа}}$  — температура газа;  $S$  — площадь стенки;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи. Этот закон записан в необходимых переменных, но коэффициент теплоотдачи зависит от большого числа факторов.

При конвективном теплообмене расчет коэффициента  $\alpha$  выполняется по следующему алгоритму.

- 1) Рассчитывается число Прандтля

$$Pr = \mu * Cp / \lambda,$$

где  $\mu$  — динамическая (абсолютная) вязкость;  $Cp$  — удельная теплоемкость газа;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газа. Указанные параметры являются функциями температуры.

- 2) Рассчитывается число Грасгофа

$$Gr = d^3 \rho^2 g a |T - T_{\text{см}}| / \mu^2,$$

где  $d$  — характерный размер;  $\rho$  — плотность газа;  $g$  — ускорение свободного падения;  $a = 1/T_{\text{см}}$ ,  $T_{\text{см}}$  — среднее значение между температурой стенки  $T$  и температурой газа.

- 3) Рассчитываются число Рэлея

$$Ra = Pr \times Gr.$$

- 4) Вычисляется число Нуссельта  $Nu$ .

- 5) Вычисляем коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \lambda / d.$$

Формулы для вычисления числа Нуссельта являются эмпирическими и зависят от конфигурации обтекаемого объекта. Подобные формулы приведены, например, в [1].

На основе этого алгоритма была создана модель конвективного теплообмена в отечественном комплексе МДС [2] и проверена на тестовой задаче теплообмена с окружающей средой (воздух) стальной пластины размером  $0,1 \times 0,1 \times 0,01$  м, расположенной вертикально. Сравнение результатов моделирования проводилось с программным комплексом Amesim [3], широко распространенным за рубежом.

Результаты расчета температуры стальной пластины, нагретой до 393 К (начальная температура) и остывающей на воздухе без обдува (скорость движения воздуха 0 м/с) при температуре окружающей среды 293 К показаны на рис. 1.

Как видно из приведенного графика результаты расчетов в МДС и Amesim практически совпадают, относительное отличие результатов по времени приведено на рис. 2. Подобное отличие (менее 1 %) для инженерных расчетов не является существенным.

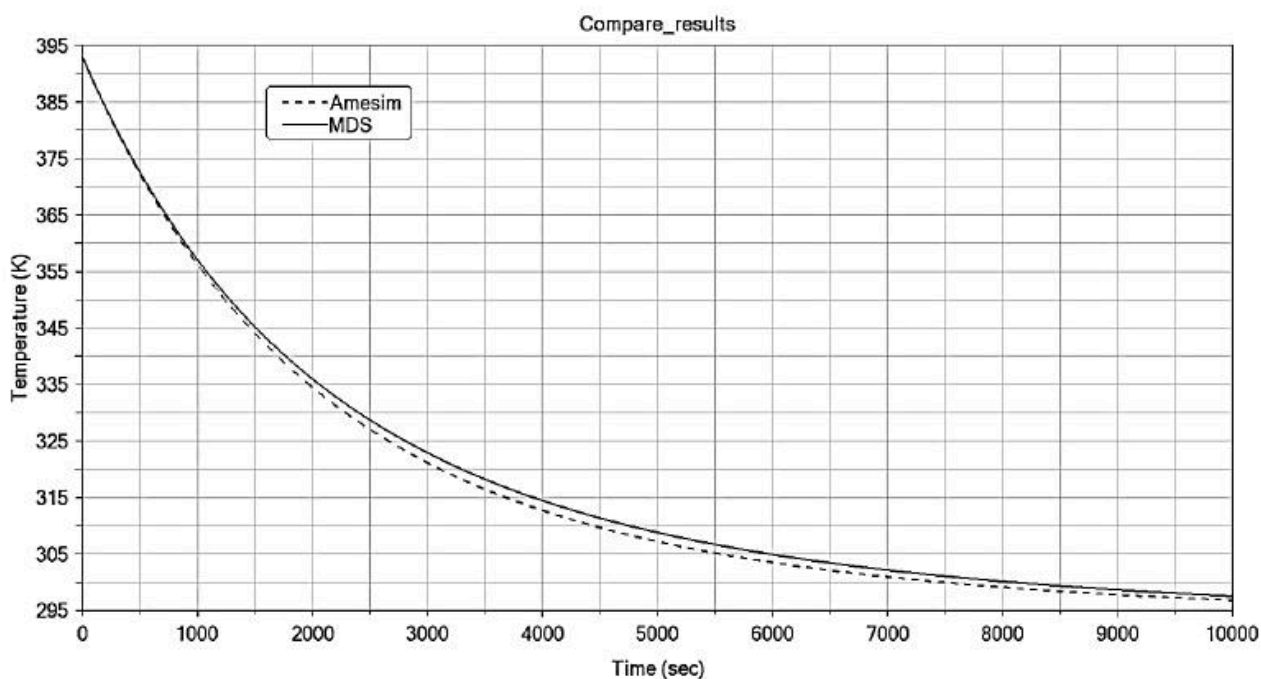


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования

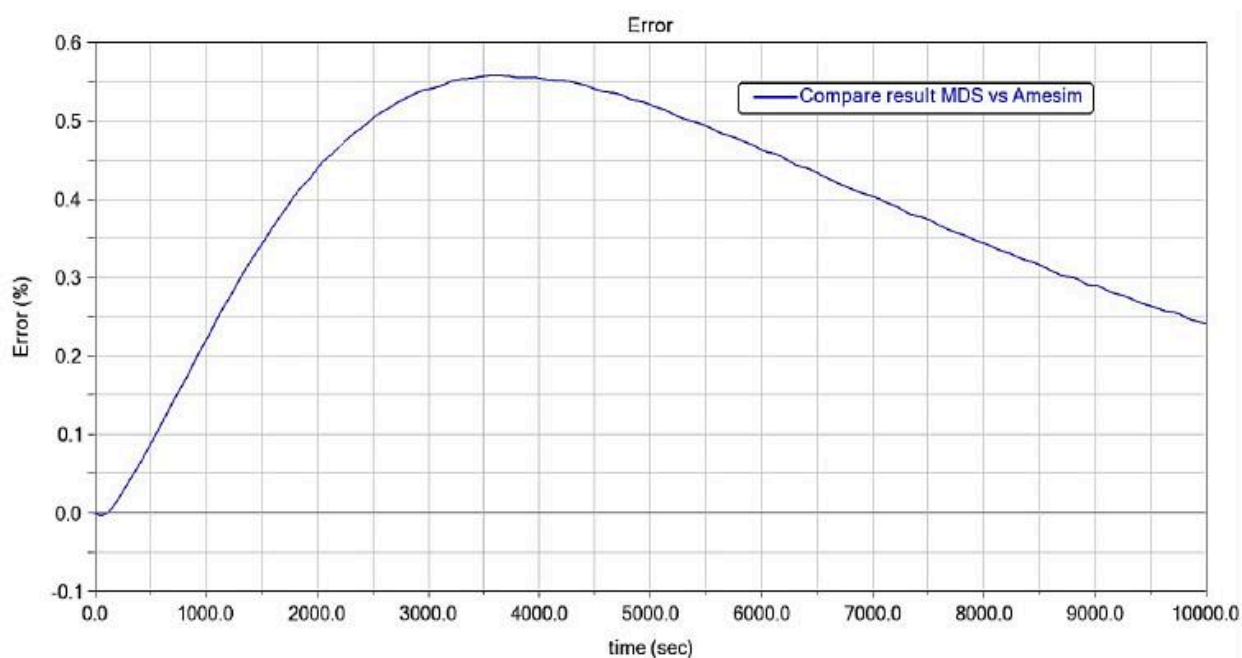


Рис. 2. Относительное отличие результатов расчета по времени

**Математическая модель теплообменника «труба в трубе».** Рассмотрим противоточный теплообменник типа «труба в трубе». Жидкости — охлаждающая жидкость во внутренней трубе и дизельное топливо во внешней. Разделителем двух жидкостей служит алюминиевая стенка.

Теплообмен происходит на всех поверхностях: на внутренней стенке внутренней трубы — между охладителем и стенкой, на внешней стенке внутренней трубы — между дизелем и стенкой, на внутренней стенке внешней

трубы — между дизелем и стенкой и на внешней стенке внешней среды — между стенкой и окружающей средой. Температура дизеля на входе  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , охладителя  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В математической модели трубопровода учитываются [4–6] — все режимы течения: ламинарный, переходной, турбулентный; зависимости плотности, вязкости, удельной теплоемкости, удельной теплопроводности от давления и температуры. Число Нуссельта для расчета коэффициента теплоотдачи рассчитывается в зависимости от режима течения жидкости. Эквивалентная схема трубопровода представлена на рис. 4.

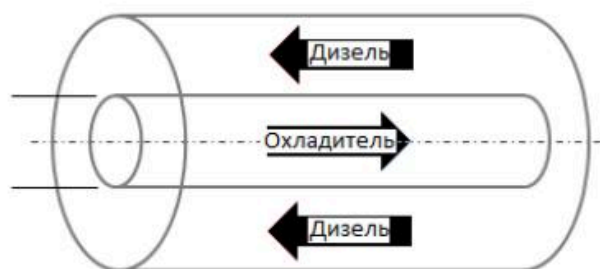


Рис. 3. Теплообменник «труба в трубе»

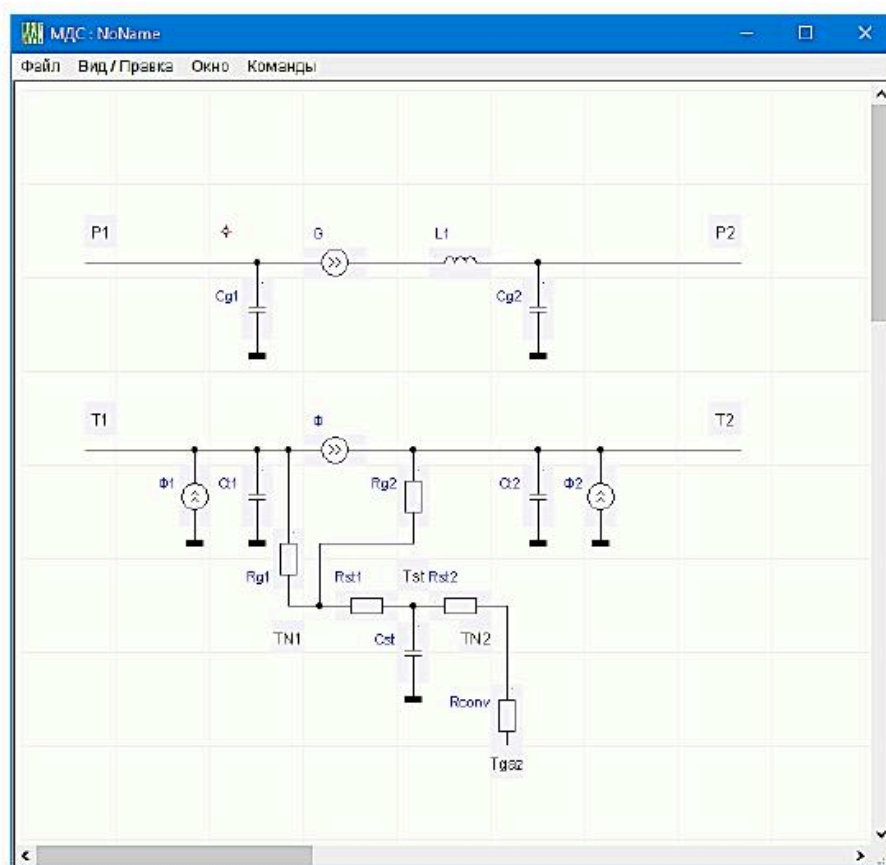


Рис. 4. Эквивалентная схема трубопровода

На эквивалентной схеме гидравлическая часть представлена элементами:  $Cg1$ ,  $Cg2$  — учитывающими сжимаемость жидкости;  $L1$  — учитывающем инерцию движения жидкости;  $G$  — учитывающем потери давления в жидкости

Тепловая часть представлена следующими элементами:  $Ct1$ ,  $Ct2$  — теплоемкость жидкости;  $Cst$  — теплоемкость стенок трубопровода;  $\Phi1$ ,  $\Phi2$  — тепловые потоки, обусловленные потерей давления;  $\Phi$  — тепловой поток, обусловленный массопереносом;  $Rg1$ ,  $Rg2$  — теплопроводность жидкости в радиальном направлении;  $Rst1$ ,  $Rst2$  — теплопроводность стенки трубопровода;  $Rconv$  — конвективная теплоотдача в окружающую среду.

В математических моделях элементов  $Rg1$ ,  $Rg2$  и  $Rconv$  реализованы зависимости, подобные представленным в разделе 1.

При моделировании теплообменника результаты будут тем точнее, чем больше секций трубопровода будет использовано. Для сравнения с Amesim было выбрано 5 секций. На рис. 5 представлены графики температуры дизеля на сливе и охладителя на сливе, полученные в программном комплексе Amesim. На рис. 6 — аналогичные результаты, полученные в программном комплексе МДС.

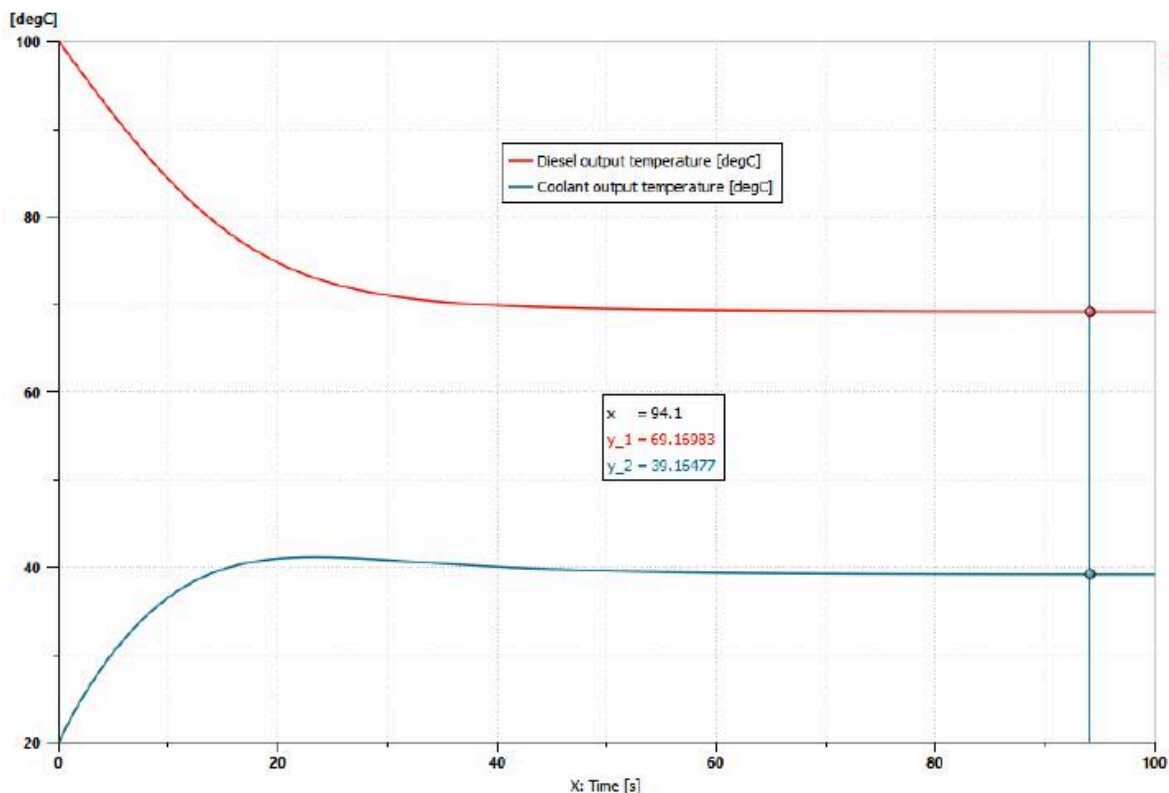


Рис. 5. Температуры дизеля и охладителя на сливе (Amesim)

Сравнение результатов моделирования в среде Amesim с результатами моделирования в отечественном программном комплексе МДС показывает, что, несмотря на различие в математических формулировках, заложенных в рассматриваемые системы инженерного анализа, процессы теплообмена в МДС и Amesim моделируются достаточно одинаково и различие в результатах составляет порядка 5 %, что, как правило, характерно для разброса данных в эксперименте.

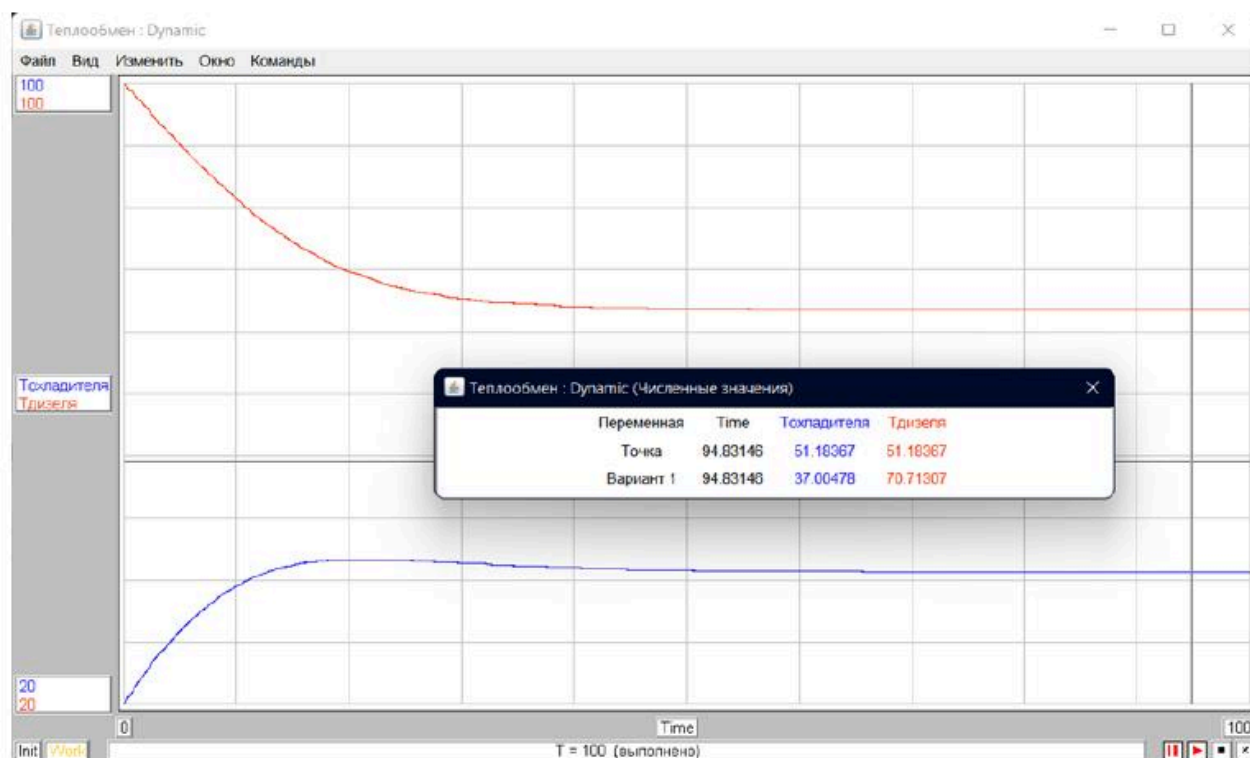


Рис. 6. Температуры дизеля и охладителя на сливе (МДС)

**Заключение.** Отечественный программный комплекс МДС может выступать в роли импортозамещающего программного продукта для моделирования сложных физических процессов в технических объектах.

## Литература

- [1] Бухмиров В.В. *Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения)*. Иваново, Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2007.
- [2] Олейников В.И., Трудоношин В.А., Георгиев А.Ф. *Моделирование динамических систем*. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023614873, 06.03.2023.
- [3] URL: <https://nslabs.ru/programmnoe-obespechenie/resheniya-siemens-plm-software/simcenter-cae/simcenter-amesim/> (дата обращения 15.09.2025).
- [4] Binder R.C. *Fluid Mechanics*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1956.
- [5] Lee W., Chang C., Lin S.S. Heat transfer and friction correlation for compact louvered fin and tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, vol. 42. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)00302-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00302-0)
- [6] Incropera F.P., Dewitt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons Inc., 1996.

## Heat exchange models in the MDS complex

Trudonoshin Vladimir Anatolyevich

trudonoshinva@bmstu.ru

Georgiev Alexandr Fedorovich

a.georgiev@bmstu.ru

Ogloblin Dmitriy Igorevich

ogldi@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

*This article shown a heat transfer modeling issues in engineering systems. An equivalent circuit diagram of a pipeline is presented, along with explanations of the physical meaning of its elements. Simulation results for a vertical plate and a pipe-in-pipe heat exchanger, obtained using the Russian domestic software SDS (Simulation of Dynamic Systems) developed for dynamic systems simulation and the Amesim are compared.*

**Keywords:** *mathematical modeling, equivalent circuit, heat transfer, heat exchange, convection, pipe-in-pipe, simulation software SDS (Simulation of Dynamic Systems), 1D simulation, comparison results*