

УДК 621.5:519.6

А. А. Андрижиевский, доктор технических наук, профессор (БГТУ);
А. Г. Трифонов, доктор технических наук, профессор (БГТУ)

КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННИКА-ОХЛАДИТЕЛЯ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

В данной работе приводится описание результатов приложения современных вычислительных средств для анализа теплотехнических характеристик теплообменника типа «труба в трубе», в котором во внутренней трубе циркулируют хладагент – 50%-й водный раствор пропиленгликоля, а в кольцевом зазоре – охлаждаемая жидкость (вода). При этом на теплопередающих поверхностях труб могут присутствовать переменные, как по времени, так и по длине, слои отложений органического и неорганического происхождения. В данной статье рассматриваются только отложения на поверхностях, контактирующих с хладагентом.

In the given work the description of results of the appendix of modern computing means for the analysis of thermo-technical characteristics of the heat exchanger of type “a pipe in a pipe” in which in an internal pipe circulate the cold carrier – 50 %-s water solution of the propilenglicoly, and in a ring backlash – a cooled liquid (water) is resulted. Thus on heat-transmitting surfaces of pipes there can be variables, both on time, and on length, layers of adjournment of an organic and inorganic origin. In given article adjournment on the surfaces contacting with the cold carrier are considered only.

Введение. Теплообменники типа «труба в трубе» нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и, в частности, в пищевой промышленности в качестве теплообменников-охладителей различного назначения. Это можно объяснить не только относительной простотой конструкции данных теплообменников, но и возможностью создания достаточно надежных алгоритмов регулирования их режимных параметров. Вместе с тем подобные алгоритмы должны учитывать динамику широкого спектра взаимосвязанных как тепловых, так и гидравлических характеристик поверхностей теплообмена и способствовать снижению энергетических затрат на эксплуатацию теплообменников.

В настоящее время при анализе теплопередающих характеристик теплообменников все чаще используются компьютерные методы. Примером такого подхода может служить работа [1], в которой приводится описание применения пакета Simulink совместно с системой MATLAB применительно к задачам моделирования и оптимизации тепло-массообменных процессов.

Постановка задачи исследования. В рамках данного исследования приняты процедура построения расчетных областей и метод решения нестационарных многомерных уравнений сохранения на основе формализованных шаблонов программного пакета *COMSOL Multiphysics* и встроеного в данный пакет метода конечных элементов.

В качестве объекта исследования на основе формализованных шаблонов программного пакета *COMSOL Multiphysics* выбран прототипный теплообменник типа «труба в трубе»,

в котором во внутренней трубе циркулируют хладагент – 50%-й водный раствор пропиленгликоля, а в кольцевом зазоре – охлаждаемая жидкость (вода) [2, 3]. При этом на теплопередающих поверхностях труб могут присутствовать переменные, как по времени, так и по длине, слои отложений органического и неорганического происхождения.

В данном модельном эксперименте приняты следующие допущения:

– отложения возникают только на поверхностях теплообменника в кольцевом зазоре, контактирующих с хладагентом (50%-го водного раствора пропиленгликоля), они одинаковые как по толщине, так и по составу;

– на поверхности трубы с охлаждаемой жидкостью (водой) формирования отложений не происходит;

– толщина отложений рассматривается в качестве параметра, изменяющегося во времени дискретно или линейно (квазистационарный режим) от 0 до 5 мм;

– природа отложений рассматривается в 2 вариантах: биообрастания (теплопроводность – 0,6 Вт/мК); соли жесткости и продукты коррозии (теплопроводность – 1,2 Вт/мК).

Приведенные выше допущения позволяют рассматривать осесимметричную задачу на установление параметров теплообменника.

На рис. 1 приведен пример геометрического расчетного шаблона, составленного с учетом принятых допущений и геометрических характеристик теплообменника: внешний радиус внешней трубы – 28 мм; внешний радиус внутренней трубы – 12,5 мм; толщина трубы – 3 мм. Толщина отложений – 0, 1, 2, 3 и 4 мм.

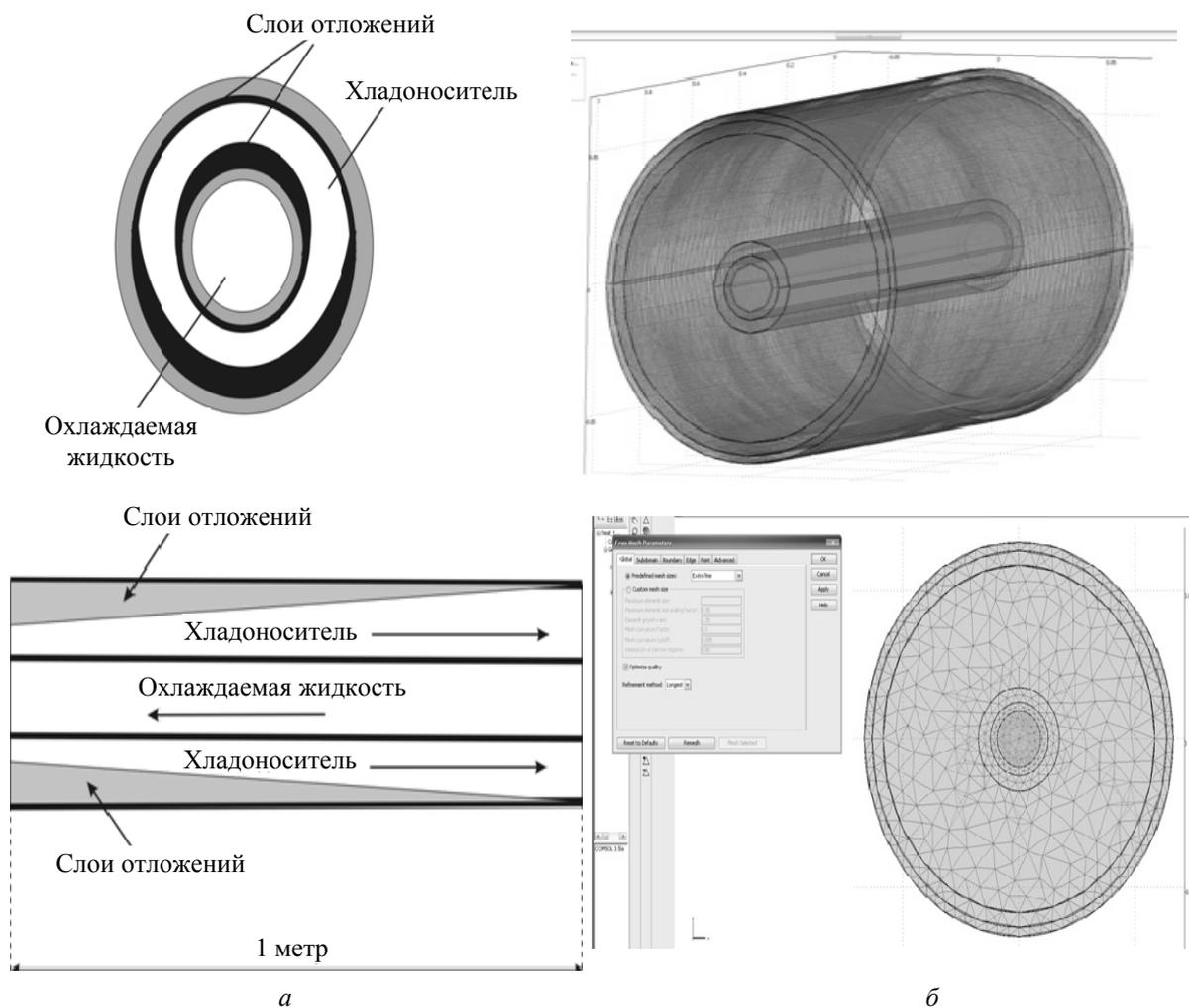


Рис. 1. Геометрический расчетный шаблон теплообменника-охладителя:

a – схема теплообменника с отложениями; *б* – конечно-элементное разбиение расчетной области

Результаты исследования. Вычислительный эксперимент выполнен в рамках формализованного расчетного шаблона программного пакета *COMSOL Multiphysics* на основе нестационарных уравнений сохранения с заданием соответствующих констант, коррелирующих коэффициентов, замыкающих соотношений, а также граничных и начальных условий.

Данная серия вычислительных экспериментов проведена при следующих параметрах: максимальные скорости рабочих тел для внутренней трубы и кольцевого зазора равны 0,1 м/с; температуры на входе хладоносителя и охлаждающей жидкости, соответственно, равны 353 и 293 К; выходное давление равно 10 350 Па.

Графическое представление результатов исследования иллюстрируется рис. 2–5 на примере серии вычислительных экспериментов для случая дискретного временного изменения толщины отложений.

На первом этапе исследований рассматривалась задача определения предельного расхода охлаждаемой воды из условия требуемого

ее охлаждения на 4°С при заданных предельных значениях перепада давления по стороне хладоносителя и величины отложений, соответственно, равных 0,6 МПа и 4 мм. Данные ограничения связаны с предельно допустимыми энергетическими затратами на прокачку хладагента.

Как показал данный вычислительный эксперимент, при указанных ограничениях предельный расход воды равен $\approx 0,012$ м³/ч.

На рис. 2 представлены профили динамических параметров теплообменника по стороне пропиленгликоля и градиент температур в сечении теплообменника за начальным участком при заданном охлаждении и расходе воды.

Как и следовало ожидать, с уменьшением величины отложений пропорционально снижается и термическое сопротивление теплопередающей стенки. Соответственно требуемый теплосъем обеспечивается при меньших расходах пропиленгликоля, что в свою очередь требует меньших перепадов давлений и мощностей на его прокачку.

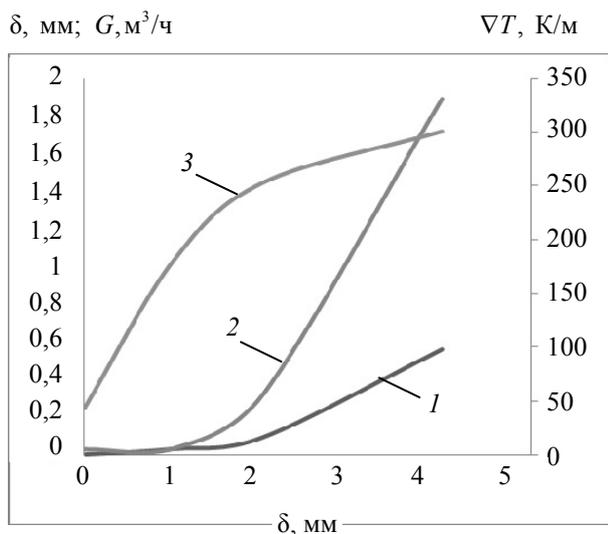


Рис. 2. Изменение параметров теплообменника по стороне пропиленгликоля в зависимости от толщины отложений (δ) при обеспечении постоянного расхода ($0,012 \text{ м}^3/\text{ч}$) и постоянного температурного перепада (4°C) со стороны воды: 1 – перепад давлений (ΔP); 2 – объемный расход (G); 3 – усредненный градиент температуры (∇T) в теплопередающей стенке

С другой стороны, характер кривой 3 на рис. 2 свидетельствует, что зависимость термического сопротивления и, соответственно тепловой эффективности теплообменника, от времени эксплуатации носит асимптотический характер с выходом на квазистационарный режим. Данные результаты позволяют сделать предварительный вывод о неэффективности интенсификации процесса теплообмена вне этой зоны и необходимости очистки поверхности теплообмена от отложений. Более детальные и обоснованные выводы можно будет сделать после рассмотрения динамики и профиля отложений и оптимизации теплогидравлических параметров теплообменника.

На рис. 3, 4 показаны поперечные профили температур в различных сечениях теплообменника. Характер данных профилей свидетельствует, во-первых, о наличии максимума термического сопротивления в центральной части теплообменника (в месте наибольших отложений) и, во-вторых, о резком его возрастании в области отложений $\approx 4 \text{ мм}$.

Одним из факторов, влияющих на эффективность процесса охлаждения в рассматриваемом теплообменнике, могут быть теплофизические свойства отложений и хладоносителя. Характер влияния этих параметров на эффективность охлаждения воды иллюстрируется рис. 5, на котором представлены профили температур теплоносителей со стороны охладителя и охлаждаемой среды и хладоносителя.

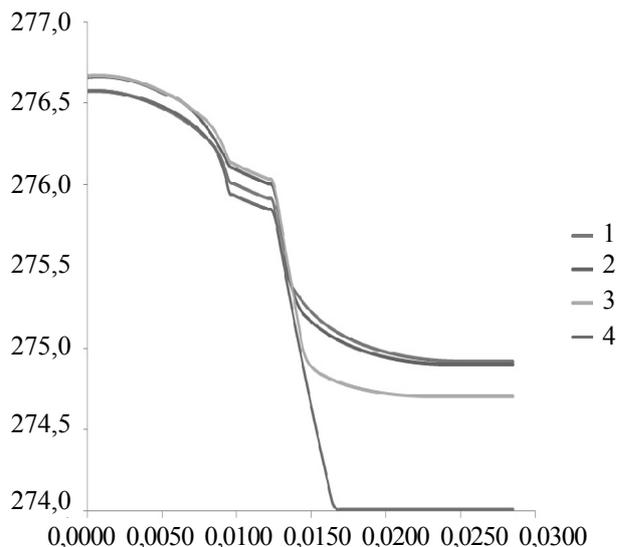


Рис. 3. Поперечные сечения температуры в теплообменнике на высоте 0,5 м для случая с отложениями размером: 1, 2, 3, 4 – 0, 1, 2, 4 мм

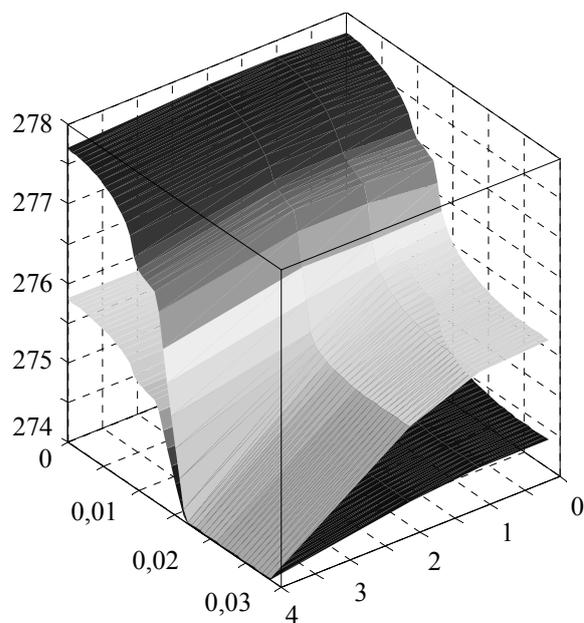


Рис. 4. Зависимость профилей температуры (диапазон изменения 274–278 К) по радиусу теплообменника (диапазон изменения 0–0,03 м) от толщины отложений (диапазон изменения 0–4 мм) для сечений на высоте 0,25 м (нижний профиль) и 0,75 м (верхний профиль)

Как следует из рис. 5, профиль температур по длине теплообменника со стороны охлаждаемой жидкости имеет вогнутый характер. С ростом термического сопротивления теплопередающей поверхности данный профиль стремится к линейному профилю, что, в свою очередь, свидетельствует о первоначально более эффективном использовании теплообменной поверхности, а в последующем – о ее нехватке.

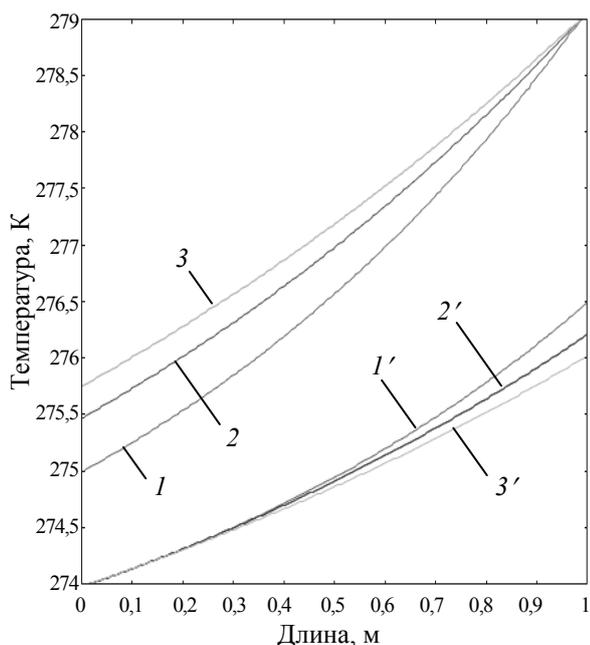


Рис. 5. Профили температур теплоносителей со стороны охлаждаемой среды (кривые 1, 2, 3) и охладителя (кривые 1', 2', 3'):

1, 1' – базовый вариант с седиментами толщиной 1 мм (коэффициент теплопроводности седимента – 1,2 Вт/(м · К), вязкость пропиленгликоля – 0,015 мПа · с); 2, 2' – коэффициент теплопроводности седимента – 0,56 Вт/(м · К), вязкость пропиленгликоля – 0,015 мПа · с); 3, 3' – коэффициент теплопроводности седимента – 0,56 Вт/(м · К), вязкость пропиленгликоля – 0,038 мПа · с

Данный вычислительный результат позволяет предложить оптимальный энергосберегающий алгоритм регулирования термодинамических параметров теплообменника.

Заключение. Разработаны модели и компьютерные программы для расчета теплотехнических характеристик теплообменника-

охладителя типа «труба в трубе» с учетом отложений на теплообменных поверхностях применительно к устройствам пищевой промышленности на основе пропиленгликоля.

1. Решение полной системы уравнений с учетом сохранения тепловой энергии на теплообменной поверхности позволило исключить из модели расчет коэффициентов теплоотдачи. Данный подход наиболее целесообразен при расчете теплообменников с существенно изменяющейся толщиной отложений.

2. В результате вычислительных экспериментов определено влияние отложений на теплотехнические характеристики теплообменного оборудования в пищевой промышленности при использовании пропиленгликоля в качестве охладителя.

3. Полученные результаты исследований могут быть использованы для оптимизации сроков проведения очистки оборудования на предприятиях, эксплуатирующих теплообменные аппараты и разработки оптимальных энергосберегающих алгоритмов регулирования их теплотехнических параметров.

Литература

1. Андрижиевский А. А. Веремеева О. Н., Трифонов А. Г. Использование программного пакета MATLAB для оптимизации теплообменника «труба в трубе» // *Exponenta.pro. Математика в приложениях*. 2004. № 1 (5).
2. Генель Л. С., Галкин М. Л. Микробиологическая безопасность систем охлаждения и кондиционирования воздуха // *Холодильная техника*. 2009. № 2. С. 3–7.
3. Галкин М. Л. Биообрастание как фактор снижения эффективности теплообмена. // *Холодильная техника*. 2011. № 5. С. 2–8.

Поступила 05.03.2014