

УДК 621.43:62-713

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ В СИСТЕМАХ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Шураев Олег Петрович¹, к.т.н., доцент

e-mail: solwrk@inbox.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. На базе математической модели поверочного расчета теплообменных аппаратов выполнено моделирование последовательно включенных по охлаждающему теплоносителю – забортной воде – охладителя наддувочного воздуха, охладителя масла и охладителя воды внутреннего контура. Показано, что математическая модель способна решать связанные задачи, что делает ее пригодной для имитационного моделирования систем, обслуживающих двигатель, а также для проектирования таких систем с учетом взаимосвязи по расходу и температурам последовательно и последовательно-параллельно соединенных теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: теплообменные аппараты, поверочный расчет, имитационное моделирование.

SIMULATION OF THE OPERATION OF HEAT EXCHANGERS IN MARINE ENGINE SYSTEMS

Oleg P. Shurayev¹, Candidate of Technical Science, Associate Professor

e-mail: solwrk@inbox.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Based on the mathematical model of the verification calculation of heat exchangers, a simulation was performed of a charge air cooler, an oil cooler, and an internal circuit water cooler connected sequentially to the cooling coolant – seawater. It is shown that the mathematical model is capable of solving related problems, which makes it suitable for simulation of systems servicing an engine, as well as for designing such systems taking into account the relationship between flow and temperatures of sequentially and sequentially-parallel connected heat exchangers.

Keywords: heat exchangers, verification calculation, simulation modeling.

Введение

При проектировании систем, обслуживающих судовые дизели, главные и вспомогательные, следует учитывать, что отдельные рабочие среды – пресная и забортная вода, воздух, масло, топливо – могут выступать и как греющие, и как нагреваемые теплоносители. В этом случае необходимо принимать во внимание, что по

рассматриваемому теплоносителю выход из одного теплообменного аппарата будет входом в другой теплообменный аппарат. В практике проектирования теплообменных аппаратов обычно тепловой и гидродинамический расчет ведется только для одного – номинального – режима работы двигателя [1, 2]. Переход к имитационному моделированию позволяет оценить параметры работы теплообменного аппарата (концевые температуры, передаваемый тепловой поток, тепловая эффективность и др.) при разных сочетаниях входных условий: режима работы двигателя, загрязнения поверхностей теплообмена, температуры забортной воды, окружающего воздуха и др. В данной работе рассмотрена работа каскада из трех теплообменных аппаратов, последовательно соединенных по контуру забортной воды.

Схема соединения теплообменных аппаратов

Рассмотрим схему соединения трех теплообменных аппаратов: охладителя наддувочного воздуха (ОНВ), охладителя масла (ОМ) и охладителя воды внутреннего контура (ОВВК), соединенных последовательно по контуру забортной воды (рис. 1).

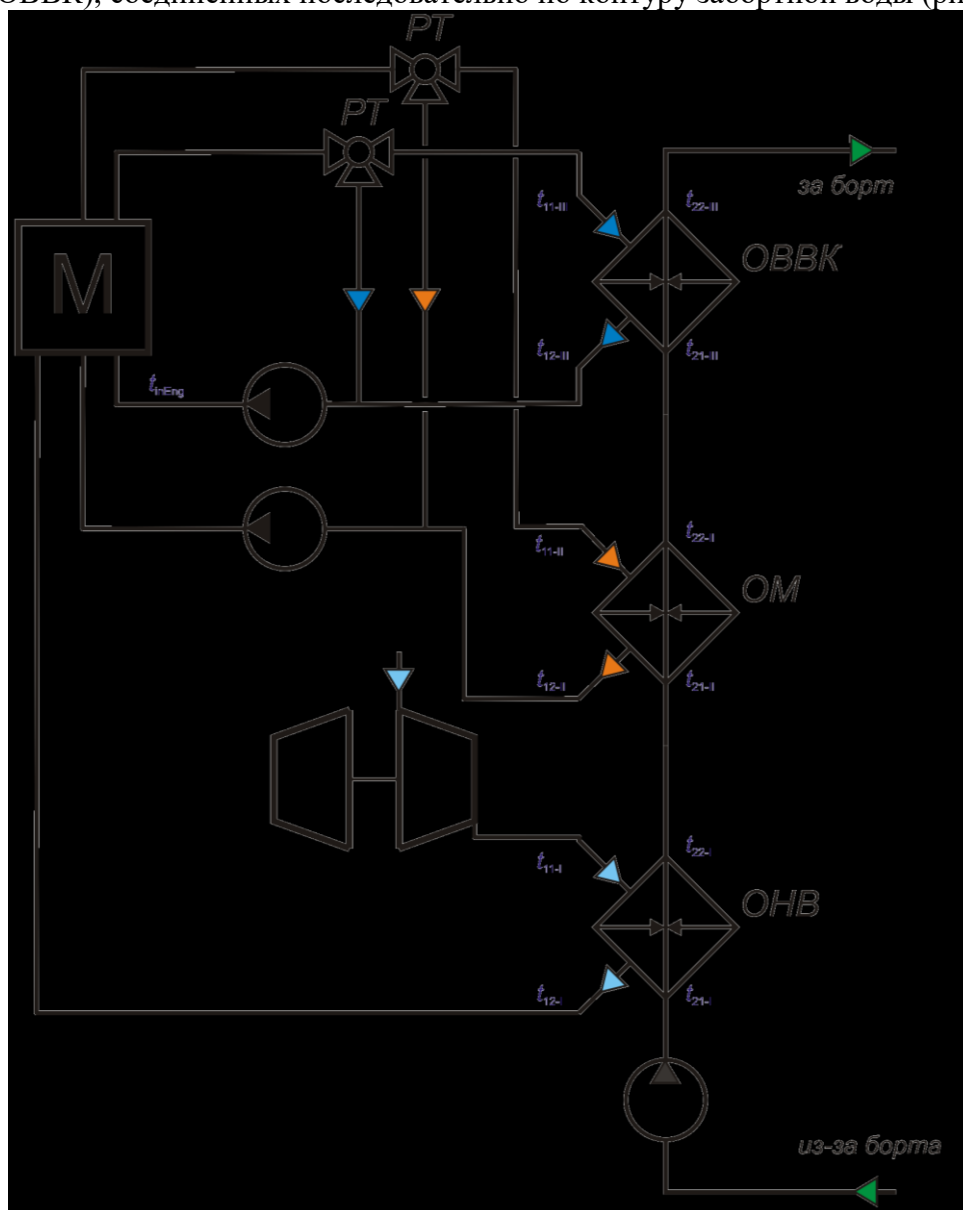


Рисунок 1 – Принципиальная схема включения теплообменных аппаратов

Такая схема широко применяется на судах, причем по ходу забортной воды соединение выполняется именно в такой последовательности: ОНВ – ОМ – ОВВК. Это объясняется с точки зрения уравнения теплопередачи:

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta t_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где Φ – передаваемый тепловой поток, Вт;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

A – площадь поверхности теплопередачи, м²;

$\Delta t_{\text{ср}}$ – средний температурный напор, К.

В ОНВ одним из теплоносителей является воздух, и коэффициент теплопередачи от воздуха к воде будет весьма низкий, поэтому для минимизации площади поверхности теплопередачи A необходимы высокие значения среднего температурного напора k . Это возможно только тогда, когда забортная вода еще не нагрелась, что обуславливает установку ОНВ первым по забортной воде в каскаде теплообменных аппаратов. Теми же соображениями руководствуются и при выборе между ОМ и ОВВК. Коэффициент теплопередачи в ОМ значительно ниже, чем в ОВВК, поэтому после ОНВ забортная вода будет подана на ОМ.

Математическая модель теплообмена в судовых теплообменных аппаратах

В конце 90-х – начале 2000-х годов была разработана математическая модель для теплового и гидродинамического расчета судовых теплообменных аппаратов [3]. Хотя назначением модели было проектирование теплообменников, в модели реализован поверочный расчет [2], так как получив размеры теплообменной поверхности, а фактически длины трубного пучка, выполняется ее увеличение – закладывается инженерный запас. И после этого возникает задача определения конечных (выходных) температур и их изменение по мере загрязнения теплообменной поверхности, которая и решается в ходе поверочного расчета.

Основу расчета составляет решение системы из 4-х уравнений: уравнения теплопередачи (1), двух уравнений теплового баланса (по уравнению для каждого теплоносителя) и уравнение для среднего температурного напора, определяющего схему тока теплоносителей [4]. Эта модель реализована в физико-математическом пакете Mathcad, и система уравнений в нем решается методом Левенберга – Марквардта. При этом искомыми величинами будут передаваемый тепловой поток Φ , температуры на выходе из теплообменного аппарата по каждому теплоносителю t_{12} и t_{22} , и средний температурный напор $\Delta t_{\text{ср}}$. То есть решается система из 4-х уравнений с 4-мя неизвестными. Если необходимо учесть изменение теплоемкости от температуры, система дополняется еще двумя уравнениями для поиска определяющей температуры теплоносителей. Полученные значения позволяют построить график изменения температуры теплоносителей по площади (длине) теплообменного аппарата, а также изменения температуры трубок и температурного напора.

Реализация именно поверочного расчета позволила в дальнейшем использовать эту модель для имитационного моделирования работы теплообменного аппарата [5], в ходе которого могут быть решены задачи поиска наиболее благоприятных режимов работы, например, по передаваемому тепловому потоку (мощностной режим), или по величине тепловой эффективности (экономический режим). Другим направлением имитационного применения и развития математической модели стало ее использование в тренажере управления судовой дизельной установкой. Такая модель должна адекватно отзываться не только на правильные, но и на неправильные действия оператора.



Пример моделирования работы каскада из трех теплообменных аппаратов

Рассмотрим работу систем перспективного судового двигателя мощностью 750 кВт. При этом часовой расход топлива оценивается величиной 145.9 кг/ч, Подача воздуха турбокомпрессором составляет 4470 кг/ч и рассчитывается исходя из расхода топлива, а подача моторного масла, как и воды внутреннего контура подлежит определению.

На первом шаге выполнен проектный расчет, в котором принят весьма неблагоприятный сценарий охлаждения, когда температура забортной воды равна 27°C. В ходе проектного расчета для ОНВ определены необходимые расход забортной воды и площадь поверхности теплопередачи, а также средний температурный напор и температура забортной воды на выходе. Для ОМ рассчитаны расход масла через теплообменный аппарат, площадь теплообменной поверхности, средний температурный напор и температура забортной воды на выходе. Для ОВВК искомыми параметрами стали передаваемый тепловой поток, площадь теплообменной поверхности, средний температурный напор и температура забортной воды на выходе. В рассмотренном варианте расчета показано разнообразие ансамбля определяемых параметров, что отражает гибкость модели.

Следующим шагом стал поверочный расчет, а фактически имитационное моделирование работы рассматриваемых теплообменных аппаратов в системах двигателя. В этом случае площадь теплообменной поверхности и расходы теплоносителей остаются неизменными, а для всех аппаратов определяются передаваемый тепловой поток, средний температурный напор и выходные температуры теплоносителей.

Результаты моделирования показаны в таблицах 1 и 2, а на рис. 2 приведен совмещенный график изменения температуры теплоносителей для второго шага моделирования.

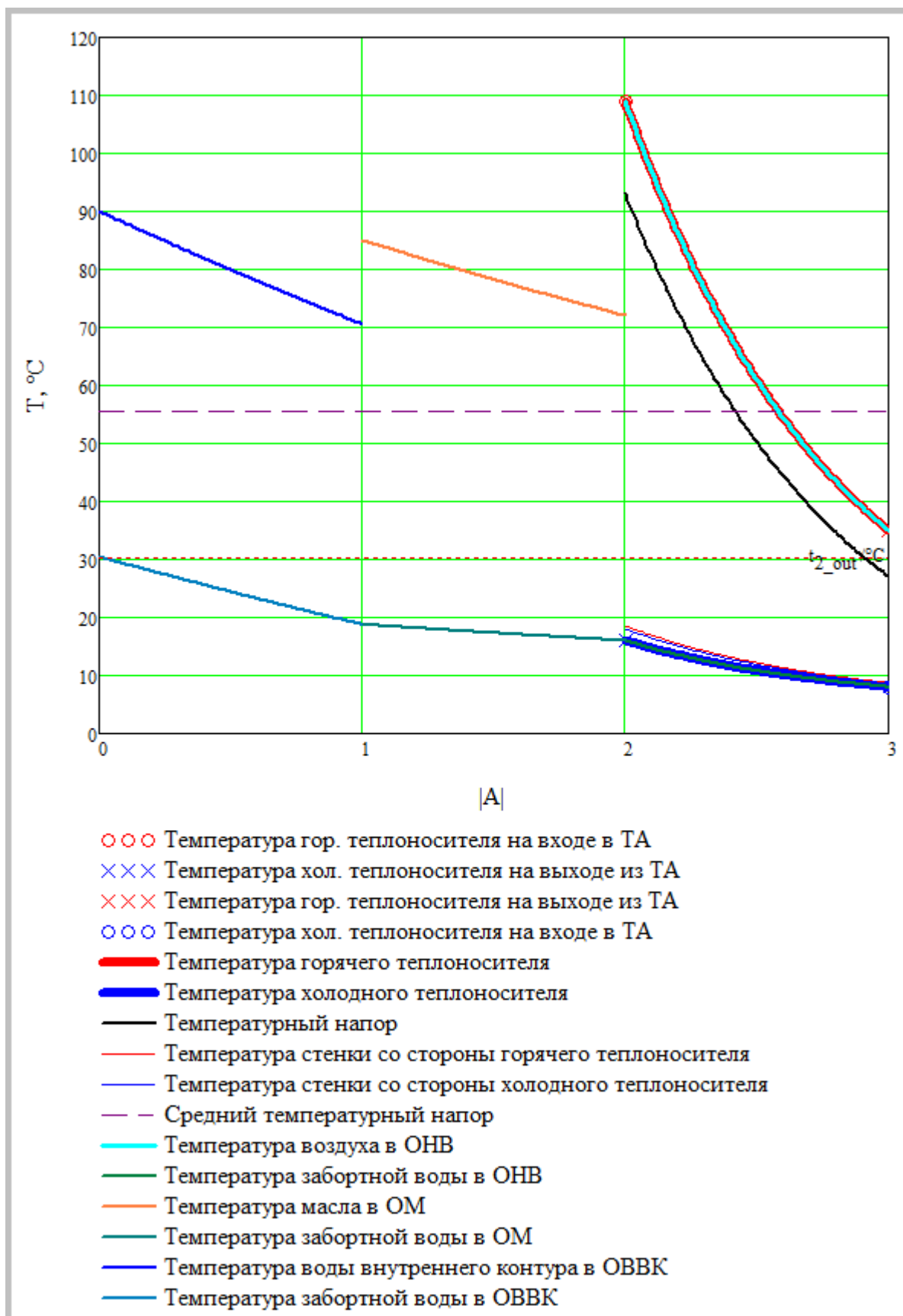
Таблица 1. Результаты моделирования: проектный расчет
при температуре забортной воды 27°C

Параметр	ОНВ	ОМ	ОВВК
Передаваемый тепловой поток, кВт	74.5	24	103.7
Площадь поверхности, м ²	27.88	1.68	0.43
Расход горячего теплоносителя	4470 кг/ч	5 м ³ /ч	6 м ³ /ч
Расход холодного теплоносителя, м ³ /ч	10		
Средний температурный напор, °C	43.4	45.4	42.4
Температура t_{11} , °C	109	85	90
Температура t_{12} , °C	49	75	75
Температура t_{21} , °C	27	33.5	35.6
Температура t_{22} , °C	33.5	35.6	44.6

Таблица 2. Результаты моделирования: поверочный расчет (имитационное моделирование)
при температуре забортной воды 8°C

Параметр	ОНВ	ОМ	ОВВК
Передаваемый тепловой поток, кВт	91.8	32.2	136.1
Площадь поверхности, м ²	27.88	1.68	0.43
Расход горячего теплоносителя	4470 кг/ч	5 м ³ /ч	6 м ³ /ч
Расход холодного теплоносителя, м ³ /ч	10		
Средний температурный напор, °C	53.5	60.8	55.6
Температура t_{11} , °C	109	85	90
Температура t_{12} , °C	35.1	71.6	70.5
Температура t_{21} , °C	8	16.0	18.8
Температура t_{22} , °C	16.0	18.8	30.4





Математический пакет Mathcad версии до 15-й включительно позволяет строить только 16 линий на графике, поэтому построение всей гаммы графиков изменения температуры по площади теплообменной поверхности (длине теплообменных труб) выполнено по селекторному принципу. В зависимости от значения переменной $SECTION = \{1, 2, 3\}$ отрисовываются точки, соответствующие значениям конечных температур, и графики температурного напора, а также более толстой линией проводятся графики изменения температуры теплоносителей в указанном теплообменном аппарате. Изменение температуры теплоносителей в каждом теплообменном аппарате отрисовываются всегда тонкими линиями.

Сравнивая данные таблиц 1 и 2, отметим, что с понижением температуры заборной воды, являющейся входной для каскада теплообменных аппаратов по заборному контуру, возрастает средний температурный напор, и согласно формуле (1) возрастает передаваемый тепловой поток. Его возрастание приводит к снижению температуры горячих сред на выходе из теплообменных аппаратов. То есть, увеличиваются тепловые потери: составляющие теплового баланса «в масло» и «в воду» (таблица 3).

Таблица 3. Результаты моделирования: составляющие теплового баланса, %

Расчет (режим моделирования)	ОМ («в масло»)	ОНВ	ОВВК	Суммарно «в воду»
Проектный (температура заборной воды 27°C)	1.4	4.3	6.0	10.3
Поверочный (имитационное моделирование - температура заборной воды 8°C)	1.9	5.3	7.8	13.2

В ОМ и ОВВК уменьшение тепловых потерь реализуется путем установки терморегуляторов в контурах горячих теплоносителей, поддерживающих постоянную температуру на входе в двигатель. Они перепускают часть потока теплоносителя помимо теплообменного аппарата. Однако в этом случае ухудшаются условия теплоотдачи, в значительной мере зависящие от скорости омывания теплообменных труб – заборную воду по ряду соображений чаще всего направляют в трубы. В ОНВ выходные температуры, как правило, вообще не регулируются. Одно из возможных решений здесь – установка регулятора температуры в заборном контуре. Но такое решение не работает при превышении температурой заборной воды значения уставки регулятора, а повышение величины уставки потребует увеличения площади теплообменных поверхностей.

Выводы

1. В разработанной модели проектирования теплообменного аппарата можно решать и задачи, связанные с его эксплуатацией в различных режимах.
2. Модель работы отдельно взятого теплообменного аппарата может быть использована как компонент при моделировании систем, включающих в себя несколько теплообменных аппаратов. При этом тип теплообменного аппарата не играет существенной роли, так как особенности теплообмена через разные поверхности «защиты» в уравнениях подобия для определения коэффициентов теплоотдачи (числа Нуссельта).
3. Уменьшение заборной температуры приводит к росту тепловых потерь в окружающую среду.



Список литературы:

1. Баев С.Ф. Судовые компактные теплообменные аппараты. Л.: Судостроение, 1965, 239 с.
2. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989. 367 с.
3. Валиулин С. Н., Шураев О. П. Математическая модель теплообменного аппарата серии ВВПИ // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2003. – № 5. – С. 149-154. – EDN PMYRWJ.
4. Селиверстов В.М., Бажан П.И. Термодинамика, теплопередача и теплообменные аппараты. М.: Транспорт, 1988. 287 с.
5. Шураев О. П. Математическая модель судовых теплообменных аппаратов и ее применение в имитационном моделировании систем дизеля. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 1. С. 178–182. – EDN NBXPMF.

