

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА РИСКА ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИХ ПОВЕРХНОСТИ

В. В. Медведев, М. В. Лакиза (Санкт-Петербург)

Введение

Судовые охладители масла (ОМ) являются важными элементами дизельных энергетических установок. Моделирование загрязнения необходимо для оценки влияния данного процесса на выбор значения запаса их поверхности. Формирование отложений представляет собой сложный характер и зависит от множества факторов. Поэтому было принято решение исследовать методом имитационного моделирования (ИМ) влияние случайного характера накопления отложений на параметры работы ОМ.

1. Исследование методом ИМ влияния случайного характера накопления отложений на параметры работы

Сложный процесс формирования отложений, носящий случайный характер, может быть качественно оценен при помощи величины риска, которая нашла применение в методологии формализованной оценки безопасности (ФОБ), рекомендованной для применения Международной морской организацией [1]. Для выполнения прогноза риска можно использовать ИМ.

Метод ИМ был применен в работе [2] для моделирования загрязнения теплопередающих поверхностей теплообменного аппарата. Однако использованный там алгоритм не учитывает стохастический характер роста отложений. В данной работе основной упор сделан на учет этого фактора.

Одной из моделей, дающих математическое обоснование росту загрязнения, является известная модель Керна-Сеатона [3]:

$$R_{F,t} = R_{F,\infty}(1 - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

где $R_{F,t}$ – термическое сопротивление в момент времени t , $R_{F,\infty}$ – термическое сопротивление в бесконечное время, β – задает константу, зависящую от свойств системы.

В целом, данная модель является математическим описанием кривой загрязнения на рис. 1. Приведенные в работе [4] экспериментальные данные показывают, что выражение (1) описывает скорее математическое ожидание значений термического сопротивления, а реальные значения будут иметь случайные отклонения от них, которые можно характеризовать неким законом распределения $f(R)$ со своими параметрами. Обработка данных [4] показала, что чаще всего подходит нормальный закон распределения. Это характерно для случаев, когда на процесс роста толщины загрязнения влияет несколько разнонаправленных факторов. Коэффициент вариации лежит в диапазоне $V=0,05-0,5$.

При рассмотрении разных вариантов назначения величины запаса площади теплообмена или времени эксплуатации теплообменника, степень тяжести последствий нежелательного события остается, обыкновенно, величиной постоянной. Это позволяет перейти, в рамках выполнения процедуры ФОБ, к нормированию риска по величине вероятности $P_{\text{доп}}$, определяемой по разработанному авторами новому методу [5].

Нахождение вероятности отказа P основана на проведении в ходе ИМ $N_{\text{исп}}$

статистических испытаний. В их ходе разыгрываются, например, методом Монте-Карло, случайные значения толщин отложений (рис. 2). С их учетом производится расчет параметров теплообменника. В результате определяется сколько раз ($N_{н.и.}$) температурный уровень T или перепад давлений Δp , определенные с выбранным значением коэффициента вариации V , привел к тому, что было превышена величина предельных значений температуры рабочих сред ОМ $T_{пр}$ или потерь давления $\Delta p_{пр}$.

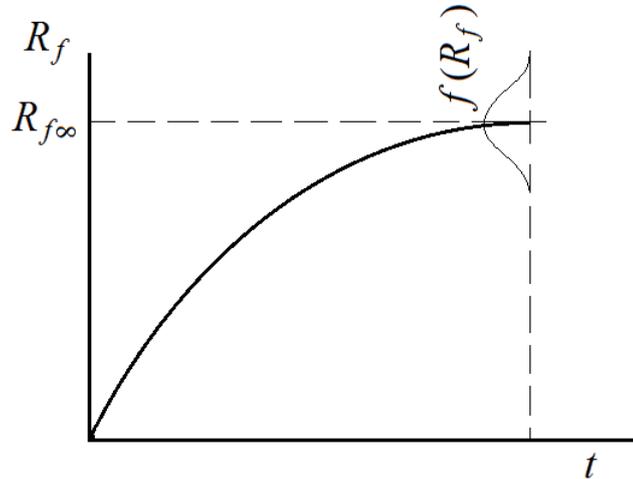


Рис. 1. Зависимость термического сопротивления загрязнения R_f от времени t

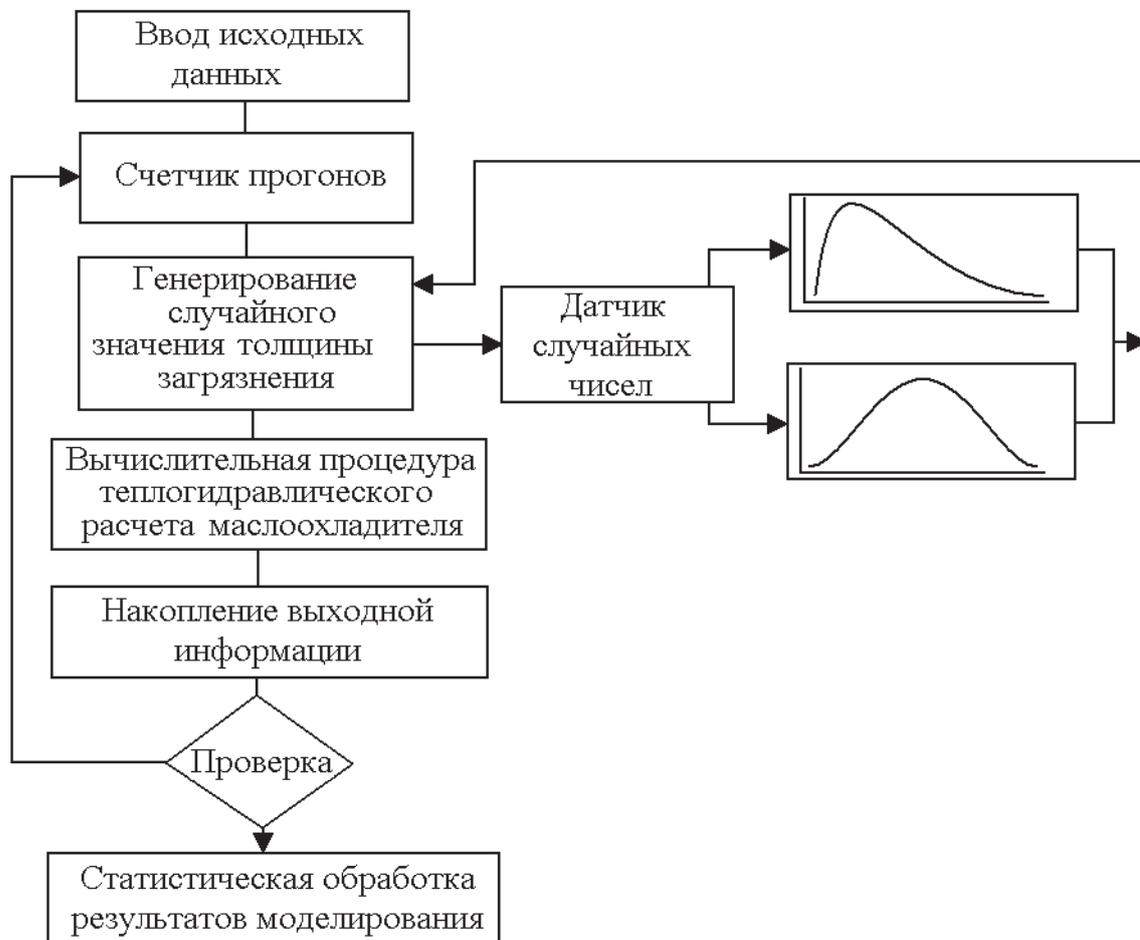


Рис. 2. Блок-схема имитационного моделирования теплового состояния ОМ

Загрязнение поверхности теплообмена вызывает как рост термического сопротивления, так и изменение коэффициента теплоотдачи. Это связано с изменением температуры стенки поверхности теплообмена, шероховатости поверхности и скорости теплоносителя. Также растут потери давления, когда толщина загрязнения становится существенной, и это приводит к сужению поперечного сечения тракта движения рабочего тела. Поэтому для учета одновременного воздействия этих факторов на параметры, характеризующие работу теплообменника, необходим тепло-гидравлический расчет всего ОМ.

2. Результаты исследований и их анализ

При ИМ характерно проведение массированных статистических испытаний (100 000 и более). Это создает трудности при использовании профессиональных пакетов программ, предназначенных для расчета теплообменников, связанные с организацией ввода и вывода данных и продолжительностью счета. Предлагается в пакете выполнять только несколько вычислений для характерных режимов. К таким режимам можно отнести работу с чистой поверхностью теплообмена (без отложений), с отложениями при низкой, средней и высокой степени загрязнения. На основании таких расчетов можно получить аналитические зависимости, например, на основе интерполяционного многочлена Лагранжа, которые можно использовать уже в статистических испытаниях, для определения нужных для анализа риска параметров. Это позволяет резко сократить время ИМ.

Для получения количественной оценки получаемого эффекта, работа теплообменника моделировалась в лицензионном программном обеспечении Xchanger Suite v.7.2 компании HTRI (США). Расчеты выполнялись в программном модуле Xist для кожухотрубчатых теплообменных аппаратов (рис. 3).

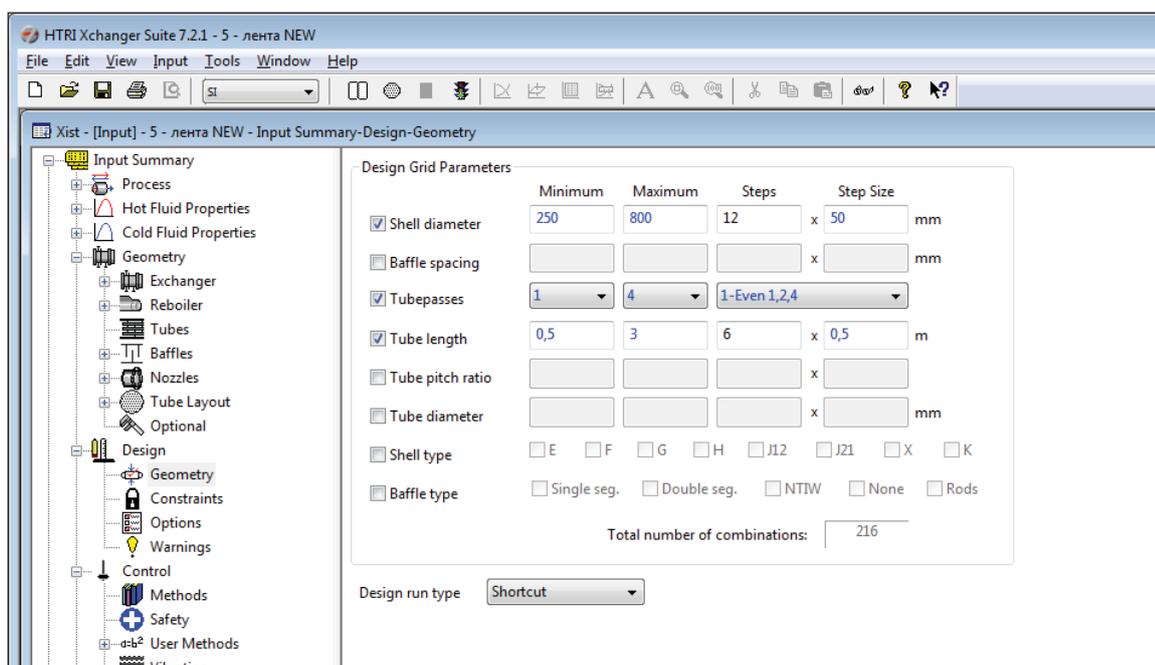


Рис. 3. Интерфейс программы Xchanger Suite v.7.2, указание вариантов геометрических параметров аппаратов

В качестве примера выполнен расчет судового водо-масляного теплообменника (табл.1) номинальной теплопроизводительностью $W_{ном} = 517$ кВт (рис. 4). Принято, что отложения образуются в трубном пространстве с морской водой в качестве теплоносителя. Следует отметить, что в результате расчета (табл. 2) определяются значения температур на входе, выходе и перепад давления каждого тракта движения рабочих сред в теплообменнике, а также его теплопроизводительность. Анализ полученных результатов расчета показал, что $W_{ном}$ соответствует 12%-му запасу теплообменной поверхности, тогда как без отложений теплопроизводительность составляет 580 кВт. Использование аппроксимирующих зависимостей позволило определить, что толщина загрязнения, соответствующая $W_{ном}$, должна составлять $\delta_{ном} = 0,1$ мм ($R_{f,\infty} = 0,000075$ м²К/Вт). Эта величина использована далее, как математическое ожидание толщины загрязнения, относительно которой разыгрывались случайные значения по выбранному закону распределения. Какой из полученных параметров (или их комбинация) является определяющим, при выборе варианта конструкции теплообменника, зависит от его назначения и является предметом отдельного исследования. В данном случае в качестве таких параметров назначены предельное значение температуры $T_{пр} = 65,0^{\circ}\text{C}$ и перепада давления теплоносителя $\Delta p_{пр} = 76,5$ кПа. Эти величины определены из условия нежелательности уменьшения теплопроизводительности теплообменника более чем на 15% (до 439,5 кВт). Температуры и перепад давления удобно использовать потому, что эти величины могут быть определены непосредственно прямым замером на работающей установке с помощью, чаще всего, штатных приборов.

Для проведения статистических испытаний использована разработанная авторами программа на алгоритмическом языке Borland Delphi [6]. В программе предусмотрена возможность выбора закона распределения и задания его параметров (рис. 5). Вводятся также результаты расчета теплообменника в модуле Xist, а также $\delta_{ном}$, $T_{пр}$ и $\Delta p_{пр}$.

Таблица 1

Данные конструкции судового охладителя масла

Шифр аппарата	Высота, м	Длина, м	Диаметр корпуса по фланцу, м	Диаметр корпуса внутренний, м	Масса, кг
40M.000.04	0,745	2,34	0,58	0,49	1180

Таблица 2

Влияние отложений в трубном пространстве ОМ с морской водой в качестве теплоносителя

Загрязнение поверхности	Коэффициент термического сопротивления, м ² К/Вт	Толщина загрязнения, мм	Температура в межтрубном тракте, °С		Температура внутри труб, °С		Теплопроизводительность, кВт	Перепад давления в трубах, кПа
			Вход	Выход	Вход	Выход		
Чистая	0	0	74	62,70	54	59,81	580	65,5
Низкое	0,00015	0,2		64,59		58,58	457	74,93
Среднее	0,0003	0,4		66,32		57,75	374	86,88
Сильное	0,00075	1		69,51		56,20	219	147,77

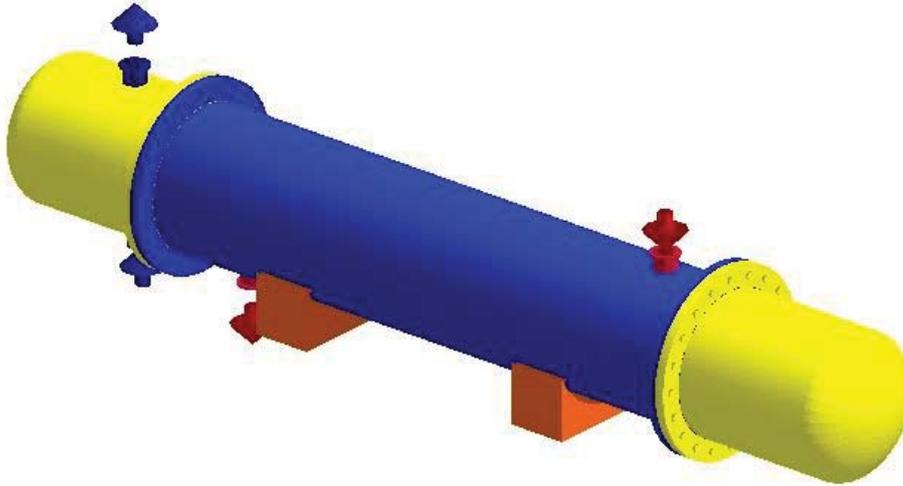


Рис. 4. Судовой водо-масляный кожухотрубный теплообменник, смоделированный в среде Xchanger Suite v.7.2

Используя гипотезу о нормальном законе, статистические испытания при $V = 0,5$ и $N_{\text{исп}} = 100\,000$ показали, что вероятность превышения по уровню температур T равна $0,122 \pm 0,001\%$, а для Δp – $0,437 \pm 0,002\%$, в целом для теплообменника $P = (0,559 \pm 0,004)\%$. Наибольшее превышение над $T_{\text{пр}}$ в испытаниях составило $0,58^\circ\text{C}$, над $\Delta p_{\text{пр}}$ – $4,74$ кПа. Максимальная толщина загрязнения достигала $\delta_{\text{max}} = 0,31$ мм.

Определение значения величины вероятности нежелательного события P позволит лицам, принимающим окончательное решение, обосновано предпринимать дальнейшие действия, в частности при назначении запасов площади теплообмена при проектировании или периода очистки ОМ при эксплуатации.

Программа ИМ работы теплообменника с учетом загрязнения

Расчеты

Исходн. дат

N stat isp: 100000 V - koefvariats: 0.5

Kol-vo teploobmennikov: 1

Kol-vo traktov: 1 S nom, mm: 0.1

Value	Lost	minim	normal	maxim	Predel
t, C	62.7	64.59	66.32	69.51	65
dp, kPa	65.5	74.93	86.88	147.77	76.5
S, mm	0	0.2	0.4	1	0

Stat Zakon

Normal Log-Normal

Start

Results

Value	t	dp	P otk t-dp
P otk	0.00121999	0.00436996	0.00558461
+_-	0.00000579	0.00002073	0.00003746
Max prev	0.58	4.74	0

P otk to: 0.0055846 +_- 0.00003746

S max, mm: 0.31195000

Рис. 5. Диалоговое окно программы

Заключение

С использованием ИМ удастся количественно оценить надежность работы ОМ с учетом случайного характера накопления отложений в течение исследуемого периода времени.

Авторы выражают признательность компаниям Нева-ТеплоТехника и HTRI за поддержку в проведении данных исследований.

Литература

1. **Медведев В. В.** Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок: монография. – СПб.: Страта, 2013. – 352 с.
2. **Равин А. А.** Методы диагностики судового энергетического оборудования: монография. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2013. – 269 с.
3. **Kern D., Seaton R.** Theoretical analysis of thermal surface fouling // Brit. Chem. Engr., 1959, Vol 4. P.258–262.
4. **Зеттлер Х. У.** Влияние свойств поверхности и распределения потока на загрязнение поверхностей теплообмена / пер. с англ. – СПб.: Страта, 2014. – 452 с.
5. **Медведев В. В., Лакиза М. В.** Оценка риска при проектировании и эксплуатации судовых теплообменных аппаратов с учетом загрязнения поверхностей теплообмена // Морской вестник. – СПб. – 2016. – № 4(60). – С. 59–62.
6. **Медведев В. В., Лакиза М. В.** Программа расчета вероятности безотказной работы функционально связанных судовых теплообменных аппаратов с учетом стохастического процесса загрязнения теплопередающих поверхностей / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616702. – М.: 2015.