

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ СОПРЯЖЕННЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА И ИХ РОЛЬ В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Ю. М. Мацевитый, С. В. Алёхина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков

*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
г. Харьков, Украина*

Часто при исследовании теплофизических явлений в объектах энергетики не удается свести рассматриваемый процесс к задаче теплопроводности в твердом теле из-за невозможности описания теплового воздействия движущегося потока на обтекаемое твердое тело в виде известных граничных условий или невозможности определения этих граничных условий по температурным измерениям путем решения обратной задачи теплопроводности [1, 2]. В таком случае необходимо решать сопряженную задачу теплопереноса (СЗТ), т. е. одновременно определять температурное поле в твердом теле и поля температур, давлений и скоростей в потоке жидкости или газа [3–5].

Определение температурного поля в рассматриваемом твердом теле и полей давления, скоростей и температур в омывающей его жидкости или газа путем решения системы дифференциальных уравнений при известных условиях однозначности является предметом решения прямой сопряженной задачи теплопереноса (ПСЗТ).

Система дифференциальных уравнений, определяющих СЗТ, состоит из [6]

– уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность; t – время; $\mathbf{v} = (u, v, w)$ – вектор скоростей;

– уравнений движения Навье–Стокса

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\operatorname{grad}\left(p + \frac{2}{3}\mu \operatorname{div} \mathbf{v}\right) + 2\operatorname{div}(\mu \dot{\mathbf{S}}) + \mathbf{F}_V, \quad (2)$$

где p – давление; μ – динамическая вязкость; $\dot{\mathbf{S}}$ – тензор скоростей деформации; \mathbf{F}_V – вектор объемных сил, в качестве которых, как правило, рассматривается сила тяжести $\rho \mathbf{g}$;

– уравнения энергии для жидкости (газа) и его частного случая – уравнения теплопроводности для твердого тела

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} - \frac{dp}{dt} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \mu \Phi(\mathbf{v}) + q_V, \quad (3)$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; T – температура; λ – теплопроводность; q_V – объемная плотность источников теплоты; $\Phi(\mathbf{v})$ – диссипативная функция, характеризующая часть механической энергии, преобразующейся в теплоту в результате преодоления сил вязкости при движении подвижной среды.

Если рассматривается сжимаемая среда, то данная система дифференциальных уравнений замыкается, как правило, термическим уравнением состояния. При турбулентном течении для вычисления турбулентных составляющих вязкости и теплопроводности в систему уравнений вводят дифференциальные уравнения, описывающие законы сохранения для дополнительных физических величин, таких как турбулентная кинетическая энергия, скорость ее диссипации и т. п.

Условия однозначности в случае сопряженной задачи теплопереноса включают в себя:

- геометрическую информацию о рассматриваемой системе;
- теплофизические свойства твердого тела и жидкости (газа);
- начальные условия, т. е. поля температур, давлений, скоростей и возможно других физических параметров в твердом теле и жидкости (газе) в начальный момент времени;
- информацию о внутренних источниках и стоках теплоты и массы;
- граничные условия.

Если при рассмотрении СЗТ одно или несколько условий однозначности неизвестны, но есть дополнительная информация об искомым параметрах исследуемых объектов, то недостающие условия однозначности можно определить путем решения идентификационной обратной сопряженной задачи теплопереноса (ОСЗТ). Когда в качестве дополнительной информации о температурном поле выступают не измеренные температуры, а некий критерий оптимальности температурного поля (например, требование минимизации температуры), то можно вести речь о задаче оптимального теплового проектирования, которую также можно отнести к ОСЗТ.

Если идентификационную ОСЗТ сформулировать в экстремальной постановке, то мы приходим к задаче поиска минимума невязки между измеренными и расчётными температурами. При этом данная невязка является функционалом, зависящим от искомым условий однозначности. Оптимизационные ОСЗТ также являются задачами минимизации функционала, форма которого определяется критериями оптимальности, выбранными по условию задачи. В обоих случаях в процессе поиска минимума целевого функционала необходимо решать целый ряд ПСЗТ при «пробных» значениях искомым параметров.

Сама по себе процедура решения ПСЗТ является довольно трудоемкой. Поэтому целесообразно применить подход, хорошо зарекомендовавший себя при решении классических ОЗТ, а именно, использование готовых программных комплексов решения прямых задач теплообмена или так называемых CFD-пакетов (ANSYS, FLUENT, PHOENICS, STAR-CD и др.). Эти комплексы являются универсальными, т. е. направлены на решение широкого круга задач, в том числе СЗТ. В них применяются хорошо отлаженные и верифицированные алгоритмы численного решения рассматриваемых систем дифференциальных уравнений. В современных программных пакетах решения задач теплообмена задачу можно целиком сформулировать в исходном файле с помощью языка описания данных. Следовательно, можно автоматизировать процедуру изменения информации в исходных данных и использовать готовые CFD-пакеты для решения ОСЗТ.

К идентификационным ОСЗТ относятся, например, задачи, в которых по температурным измерениям внутри или на поверхности твердого тела необходимо определить параметры потока жидкости (газа). Одной из таких интересных задач представляется определение степени турбулентности потока.

В ряде случаев, например при определении граничных условий на поверхностях элементов турбомашин, может возникнуть необходимость в идентификации граничных условий на поверхности тела путем решения ОСЗТ. Одним из приложений таких задач является определение граничных условий на поверхностях элементов турбомашин. В частности нами методологии решения прямых и обратных сопряженных задач теплопереноса использовалась для определения коэффициента теплоотдачи на поверхности ротора турбины К-200-130. Был проведен ряд численных экспериментов, позволивших проанализировать влияние частоты вращения ротора на теплоотдачу вала.

Рассматривалось ступенчатое лабиринтное уплотнение, фрагмент которого приведен на рис. 1. Расчетная модель состояла из 8 длинных гребней и 7 коротких, закрепленных на статоре, и включала теплоотдающий вращающийся ротор со ступеньками прямоугольной формы.

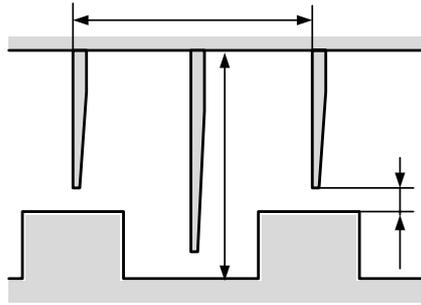


Рис. 1. Фрагмент лабиринтного уплотнения.

После решения прямой сопряженной задачи теплопереноса проводилась постпроцессорная обработка результатов с целью нахождения КТО на поверхности ротора, которая заключалась в решении обратной сопряженной задачи. Для участка поверхности ротора (например, стенки выступа) на основании полученного температурного поля находится тепловой поток q (Вт) на поверхности этого участка и его осредненная температура $T_{пов}$ ($^{\circ}\text{C}$), по которым вычисляется КТО:

$$\alpha = \frac{q}{f(T_{cp} - T_{пов})},$$

где f – площадь участка поверхности ротора, м^2 ; T_{cp} – температура основного потока рабочей среды, $^{\circ}\text{C}$.

Результаты расчетов приведены на рис. 2. Видно, что с увеличением числа Рейнольдса частота вращения ротора перестает оказывать влияние на уровень интенсивности теплообмена. Высокая скорость вращения способствует усилению теплоотдачи ротора при малых числах Рейнольдса, определяемых по осевой составляющей скорости в зазоре под гребнями уплотнения.

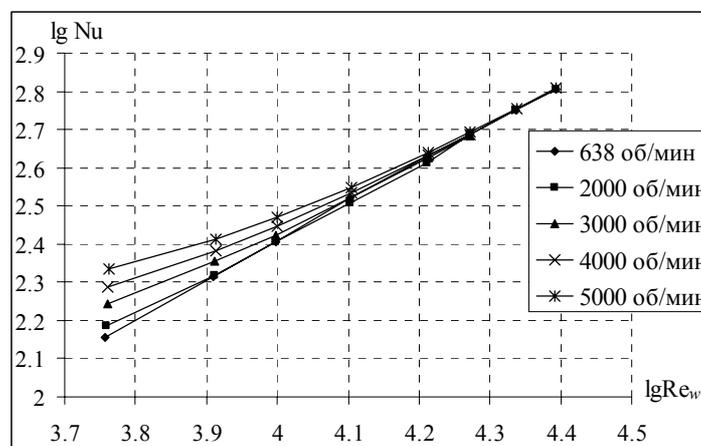


Рис. 2. Влияние скорости вращения ротора на теплоотдачу вала в лабиринтовом уплотнении.

В качестве ещё одного приложения методологии решения прямых и обратных СЗТ рассмотрим задачи, возникающие при обеспечении тепловых режимов в процессе хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Первым и пока единственным хранилищем ОЯТ на территории Украины является сухое хранилище ОЯТ (СХОЯТ) на Запорожской АЭС [7]. Отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС) хранятся в герметичных металлических корзинах, заполненных инертным газом, которые, в свою очередь, помещены в бетонный корпус контейнера. Контейнеры установлены на открытой пристанционной площадке. При хранении ОТВС в СХОЯТ необходимо следить за тем, чтобы температура оболочек твэлов

не превышала критического уровня, при котором вследствие термических напряжений может произойти их разгерметизация. В проектных документах СХОЯТ принято максимально допустимое значение температуры оболочек тепловыделяющих элементов при нормальном режиме длительного сухого хранения в гелиевой среде на уровне 350 °С. Судя по опыту эксплуатации СХОЯТ на Запорожской АЭС, для пристанционных хранилищ украинских АЭС будет характерна концентрация большого числа контейнеров на малых площадях (так, первая очередь СХОЯТ Запорожской АЭС содержит 100 контейнеров на площадке в 11904 м²). Данное обстоятельство может привести к уменьшению отвода тепла от ОТВС, расположенных в контейнерах хранения и, как следствие, к увеличению их температуры. Поэтому при исследовании теплового состояния отработавших топливных сборок, хранящихся в СХОЯТ, необходимо учитывать взаимное тепловое влияние контейнеров.

Решение СЗТ по исследованию теплового состояния группы контейнеров с подробным рассмотрением их внутренней структуры невозможно в силу ограниченности имеющихся в наличии компьютерных ресурсов. Поэтому предлагается использовать итерационный подход с применением многоуровневых расчётных моделей, который заключается в поочерёдном решении двух типов задач:

- определение теплового состояния отдельного контейнера с использованием модели высокого уровня, которая учитывает подробную геометрию контейнера хранения;
- определение параметров атмосферного воздуха, охлаждающего группу контейнеров, с использованием модели низкого уровня с упрощённой геометрией.

Итерационный процесс осуществляется следующим образом. В результате решения задач первого типа для каждого контейнера из рассматриваемой группы определяются температура и скорость воздушного потока на входе и выходе из вентиляционного тракта. Эти данные используются в граничных условиях во второй задаче, результатом решения которой являются температурное поле и поле скоростей атмосферного воздуха на площадке СХОЯТ. В свою очередь на основе этих полей формируются граничные данные для задач первого типа. Итерационный процесс считается законченным, когда изменение температуры и скорости от итерации к итерации в контрольных точках становится меньше наперёд заданной погрешности. Такой подход позволяет получить данные о температурном состоянии группы контейнеров с учётом их взаимного теплового влияния.

С использованием описанной методики были проведены расчётные исследования теплового состояния группы контейнеров. Рассматривались контейнеры, установленные в одном ряду, вдоль которого дует ветер. Такая ситуация на площадке СХОЯТ является наиболее проблемной с тепловой точки зрения, поскольку контейнеры, стоящие с подветренной стороны в данном ряду, подвергаются тепловому влиянию всех контейнеров, расположенных в нем с наветренной стороны.

Максимальные температуры в контейнерах хранения и их остаточная мощность тепловыделения представлены на рис. 3. Эти результаты соответствуют температуре окружающего воздуха, равной 40 °С (летний максимум температур в районе Запорожской АЭС) при скорости ветра 5 м/с (наиболее типичная для данной местности).

Анализ результатов исследования позволил сделать вывод о безопасности размещения тридцати восьми контейнеров в одном ряду на площадке СХОЯТ (температура ОТВС в каждом из контейнеров не превышала максимально допустимую).

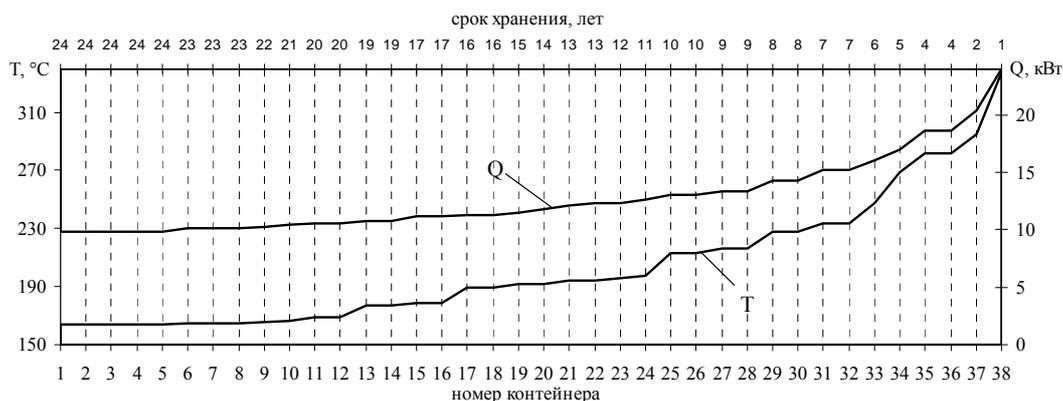


Рис. 3. Максимальная температура и остаточная мощность тепловыделения контейнеров

Широко распространёнными ОСЗТ оптимального проектирования являются задачи оптимизации геометрии поверхности обтекаемого твердого тела. Изменение формы поверхности влияет на структуру течения, а следовательно, и на теплообмен между движущейся средой и твердым телом. Таким образом, оптимизируя в результате решения ОСЗТ геометрию поверхности твердого тела, можно получить требуемый тепловой режим работы устройства. В качестве примера такого типа задач можно привести оптимизацию геометрии вентиляционного тракта контейнера хранения отработанного ядерного топлива для улучшения теплоотвода от хранящихся в нём отработанных тепловыделяющих сборок (ОТВС). Начиная с 2003 г., на Запорожской АЭС стали применяться тепловыделяющие сборки альтернативной конструкции (ОТВС-А) с большим максимальным начальным обогащением [8] и соответственно с большим остаточным тепловыделением, хранение которых в СХОЯТ не предусмотрено разработчиками контейнеров. В связи с этим возникла проблема обеспечения их безопасного хранения, что, помимо всего прочего, включает и исследования теплового состояния контейнера хранения с более высокой по сравнению с проектной интенсивностью тепловыделения ОЯТ. Схематическое устройство такого контейнера изображено на рис. 4.

Решение прямых сопряжённых задач теплопереноса позволило установить, что для последующего безопасного хранения в сухом хранилище ОТВС-А необходимо выдерживать в приреакторном бассейне как минимум 7 лет, в отличие от ОТВС традиционной конструкции которые отгружаются в хранилище после 5 лет выдержки. Также нами была решена задача по определению оптимальной ширины кольцевого вентиляционного канала контейнера, который используется в СХОЯТ Запорожской АЭС. Температура наружного воздуха принималась равной 40 °C при нулевой скорости ветра (штиль), то есть рассматривались самые неблагоприятные для нормального хранения ОЯТ погодные условия.

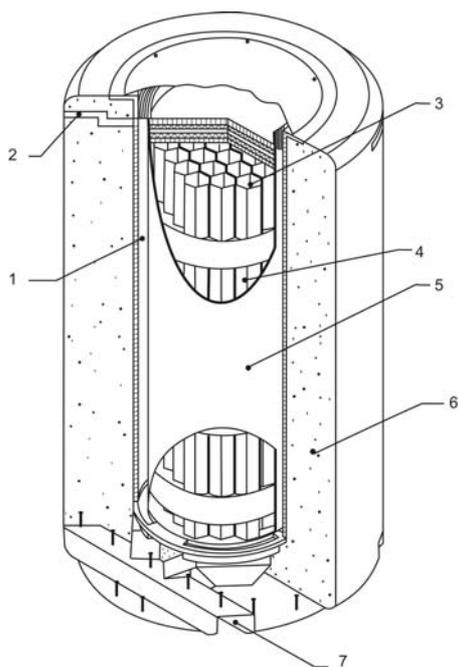


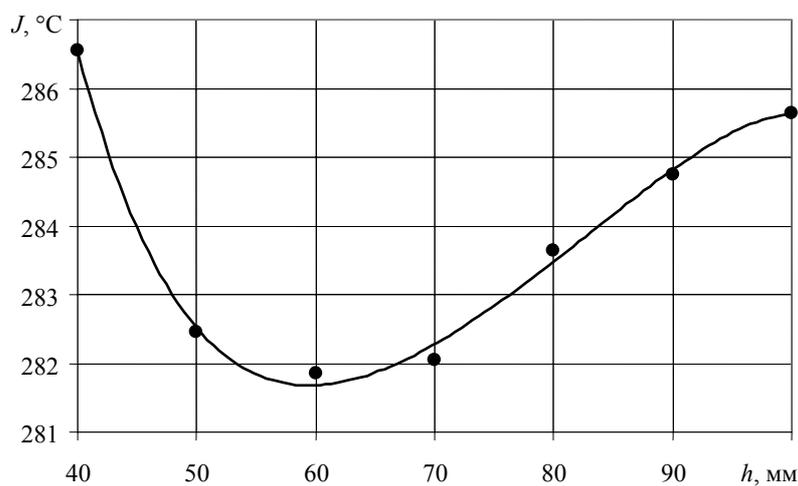
Рис. 4. Структура контейнера хранения ОЯТ:

1 – вентиляционный кольцевой канал; 2 – выходной канал; 3 – ОЯТС; 4 – направляющие трубы; 5 – корпус герметичной корзины; 6 – корпус контейнера; 7 – входные каналы для охлаждающего воздуха

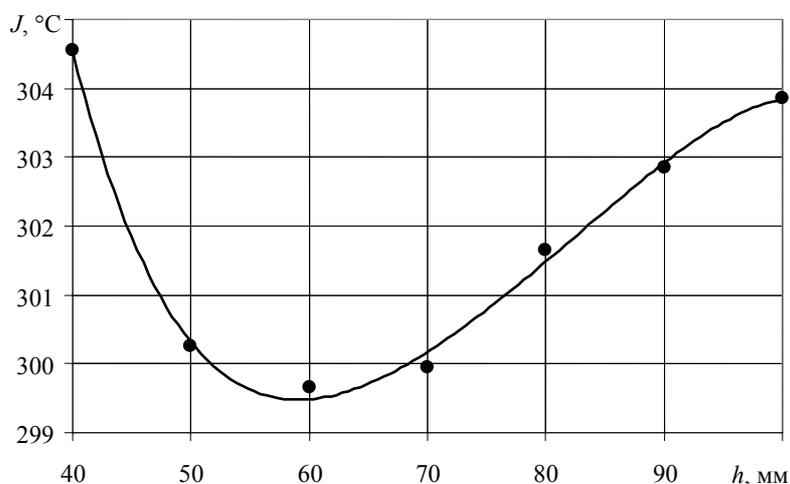
В таблице 1 представлены результаты расчётов для различных значений ширины канала (T_{\max} – максимальная температура ОЯТС; v – скорость воздуха в кольцевом канале; $T_{\text{в}}$ – температура воздуха на выходе из вентиляционного тракта; m – массовый расход воздуха). На рис. 5. приведены кривые, аппроксимирующие эти результаты.

Таблица 1. Влияние ширины кольцевого канала на теплофизические параметры контейнера хранения ОЯТ

Ширина канала, мм	ОЯТС традиционной конструкции				ОЯТС-А с большим максимальным начальным обогащением			
	T_{\max} , °C	v , м/с	$T_{\text{в}}$, °C	m , кг/с	T_{\max} , °C	v , м/с	$T_{\text{в}}$, °C	m , кг/с
40	286,5	0,429	89,8	0,294	304,5	0,447	94,3	0,330
50	282,4	0,510	80,0	0,371	300,2	0,531	83,7	0,382
60	281,8	0,582	72,9	0,438	299,6	0,605	76,1	0,452
70	282,0	0,638	66,3	0,497	299,9	0,664	69,3	0,512
80	283,6	0,697	64,2	0,550	301,6	0,724	66,7	0,567
90	284,7	0,743	61,4	0,595	302,8	0,771	63,7	0,613
100	285,6	0,782	59,2	0,634	303,8	0,811	61,5	0,652



а)



б)

Рис. 5. Зависимость величины минимизируемого целевого функционала от ширины кольцевого канала:
а) – ОТВС; б) – ОТВС-А;

• – вычислительный эксперимент (табл. 1); — — аппроксимационные зависимости

В результате получены следующие значения оптимальной ширины кольцевого канала: в случае хранения ОТВС $h^* = 59,5$ мм, в случае хранения ОТВС-А $h^* = 59,1$ мм. Из рис. 5 также видно, что небольшие отклонения (в пределах 12 мм) ширины кольцевого канала от оптимальных значений не приводят к существенным изменениям максимальной температуры (эти изменения не превышают 1 °C). Таким образом, можно сделать вывод, что любое значение ширины кольцевого канала из диапазона 48÷71 мм является приемлемым с точки зрения безопасного хранения как ОТВС, так и ОТВС-А. В частности, при переходе на хранение ОТВС-А в СХОЯТ Запорожской АЭС можно не изменять геометрические размеры контейнера хранения (в настоящее время для ОТВС они изготавливаются с $h = 70$ мм).

Выводы

Используя методы решения прямых и обратных СЗТ, можно при меньших финансовых и временных затратах (по сравнению с затратами на экспериментальные исследования) решать достаточно сложные задачи, возникающие при проектировании, эксплуатации и модернизации энергетического оборудования. В частности применение современных подходов к определению условий теплообмена на поверхности ротора позволило проанализировать влияние частоты вращения вала на распределение КТО. В ходе исследования было показано, что при числа Рейнольдса, больших 7500 частота вращения

ротора перестает оказывать существенное влияние на условия теплообмена на его поверхности.

При исследовании теплового состояния контейнеров хранения отработанного ядерного топлива в сухом хранилище Запорожской АЭС обнаружено, что в одном ряду можно устанавливать достаточно много контейнеров, не нарушая при этом условий безопасной эксплуатации хранилища, а с помощью решения оптимизационных обратных СЗТ определена оптимальная ширина вентиляционного канала контейнера хранения отработанного ядерного топлива и выработаны рекомендации по выбору этого параметра при изготовлении контейнеров хранения отработавших топливных сборок различных типов.

Литература

1. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности: В 2-х т. Т. 1. Методология. – Киев: Наук. думка, 2002. – 408 с.
2. Алифанов О. М. Обратные задачи теплообмена. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
3. Лыков А. В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978. – 479 с
4. Лыков А. В. Сопряженные задачи конвективного теплообмена / А. В. Лыков, В. А. Алексашенко, А. А. Алексашенко. – Минск: Изд-во Беларус. ун-та, 1971. – 346 с.
5. Никитенко Н. И. Сопряженные и обратные задачи тепломассопереноса. – Киев: Наук. думка, 1988. – 240 с.
6. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справ. пособ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
7. Официальный сайт Запорожской АЭС. Устройство и описание СХОЯТ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.npp.zp.ua/snfs/description>.
8. Депенчук А. А. Опыт эксплуатации ТВСА на Запорожской АЭС / А. А. Депенчук, Ю. А. Шишков, О. С. Кабаков // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2008. – Вып. 1 (29). – С. 23–29.