УДК 658.52.011.56:669.2/8

Е.А.АЛСУФЬЕВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ УЗЛА ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АНОДОВ МАГНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

Представлены результаты компьютерного теплового расчета узла водяного охлаждения анодов бездиафрагменного магниевого электролизера на силу тока 228 кА. Для численного решения задачи выбрана система Matlab, которая включает пакет Partial Differential Equation (PDE), содержащий средства для численного моделирования нестационарных физических полей, описываемых уравнениями в частных производных второго порядка.

The article presents the results of computer-based thermal design of the water-cooled unit for anode cooling at bladderless magnesium electrolytic tanks. The Matlab software has been used for numerical computation. The software includes the PDE toolbox for numerical simulation of non-steady physical fields described by partial differential equations.

Водяное охлаждение применяется на предприятиях уже около 15 лет для интенсифицирования процесса путем искусственного отвода тепла от анодных головок. Регулирование интенсивности охлаждения путем изменения расхода воды на охлаждение анодов также обеспечивает поддержание температуры электролита в заданных пределах и исключает необходимость установки токосъемных шунтов, в результате чего уменьшатся выделение тепла в цех и удельный расход электроэнергии. При этом отпадает необходимость отключения и подключения анодов для регулирования температуры процесса.

При разработке устройства охлаждения исследования эффективности его работы проводились в Институте титана на экспериментальной установке [3]. Основной задачей этих исследований являлось экспериментальное определение величины теплового потока от источника тепла к холодильнику через графитовый брус, имитирующий анодную головку.

Но и в настоящее время исследование теплового режима узла охлаждения является актуальной задачей. Так на одном из титано-магниевых предприятий сложилась ситуация, при которой оказалось невозможно регулировать температуру электролита в необходимом диапазоне путем изменения расхода воды на охлаждение анодов. При снижении расхода воды в кессонах происходит переход от вынужденного конвективного теплообмена к теплообмену при кипении на поверхности стенки кессона, и в результате роста коэффициента теплоотдачи теплосъем с анода не уменьшается.

Поэтому было решено провести компьютерный тепловой расчет узла водяного охлаждения анода путем решения задачи теплопроводности в анодном массиве, медной шине и стальных кессонах при наличии внутренних источников выделения тепла.

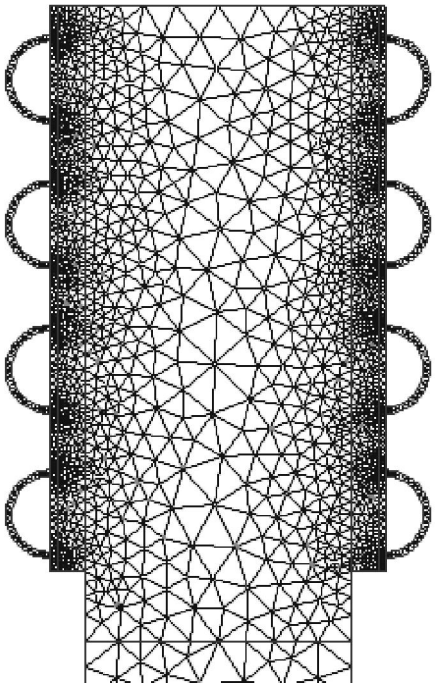


Рис.1. Пример вычислительной сетки

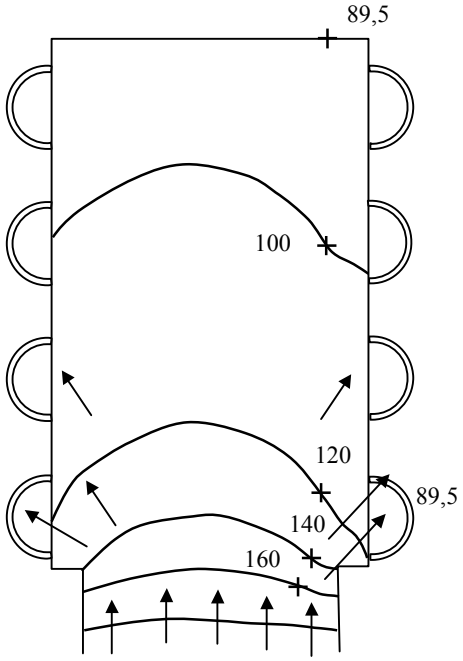


Рис.2. Температурное поле головки анода при расходе воды 16 м^3/ч

Для численного решения задачи выбран пакет Partial Differential Equation (PDE) системы Matlab, который содержит средства для численного моделирования нестационарных физических полей, описываемых уравнениями в частных производных второго порядка в двумерной области [2]. В пакете используется проекционный метод Галеркина с конечными элементами. В PDE реализовано автоматическое сеточное разбиение и выбор величины конечных элементов, демонстрация принятого разбиения и возможность визуализации полученного в ходе решения распределения температур, что позволило нам сосредоточиться на программировании существа задачи, а средства визуализации результатов расчета использовать стандартные.

При расчетах использовались следующие исходные данные:

Сила тока, кА	228
Ширина анода, м	1,65
Толщина анода, м	0,15
Высота катода, м	0,86
Температура электролита, °С	670
Удельное сопротивление графитовых анодов, Ом·м	$7{,}4\cdot10^{-6}$
Температура охлаждающей воды на входе в кессоны, °С	50-90
Температура охлаждающей воды на выходе из кессонов, °С	90-120
Расход воды на охлаждение, м^3/ч	4-16

Узел охлаждения представляет собой кессоны в виде полутруб, приваренные к стальной пластине и смонтированные на вертикальных поверхностях анодных головок электролизера.

Поскольку ширина анода (1,65 м) более чем в 10 раз превышает толщину анода (0,15 м), применялась двухмерная постановка задачи, т.е. рассматривалось температурное поле в сечении в центре анода.

На рис.1 представлен пример грубой сетки верхней части среднего сечения, в котором решалась задача теплопроводности.

Для обеспечения заданной точности вычисления тепловых потоков (1 %) реальная расчетная сетка содержала порядка 300 тысяч треугольников.

На рис.2 представлено температурное поле головки анода при водяном охлаждении.

Схема подачи воды по полутрубам кессона применяется последовательная, т.е. вначале на нижнюю трубку на правой сто-

Опытные и расчетные данные

Показатель	Режим 1		Режим 2		Режим 3	
	Опытные	Расчетные	Опытные	Расчетные	Опытные	Расчетные
Температура окружающей среды	30		35		37	
Температура воды на входе	79		76		84	
Температура воды на выходе	100	103,03	98,5	101,46	105	109,18
Расход воды на электролизер	16		15,2		15,2	
Теплосъем водой	21,80	25,70	22,20	25,91	20,70	25,53
Температура второй сверху стальной трубы	92	93,80	91	91,80	98	99,50
Температура верхней грани	116	110,50	116	109,00	120	115,80
Температура на выходе из перекрытия	228	221,80	224	220,90	230	224,10

роне анода, затем с выхода первой трубки на вторую трубку снизу на правой стороне анода, далее на третью и четвертую, а затем на верхнюю трубку с левой стороны анода, и так далее последовательно вниз. Поэтому граничные условия третьего рода (средняя температура воды в трубе и коэффициент теплоотдачи внутри каждой трубки) зависят от температуры воды на входе в данную трубку и температуры стенки кессона в среднем сечении.

Расчет при различных расходах воды выявил возможность возникновения неразвитого пристеночного кипения при температуре воды ниже температуры насыщения при данном давлении, поэтому расчет в программе производится итеративно, на каждом шаге решается задача стационарной теплопроводности для нахождения температур поверхностей и расчета тепловых потоков.

На внешних поверхностях в зависимости от температуры поверхностей охлаждения рассчитывались суммарные коэффициенты теплоотдачи естественной конвекции воздуха и излучения.

При расчете коэффициентов теплоотдачи в режиме вынужденной конвекции, теплоотдачи при неразвитом кипении и расчете критических плотностей тепловых потоков в программе использовались известные методики, принятые при тепловой и гидравлическом расчете теплообменного оборудования АЭС [1].

Для идентификации тепловой модели использовались значения температур, замеренных при помощи термопар на действующих электролизерах (см. таблицу).

Согласованность результатов расчета по математической модели с экспериментом позволила использовать данный подход для расчета новых конструкций узла охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС: Методические указания. Руководящий документ по стандартизации РД 24.035.05-89 / Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения СССР. Л., 1991. 211 с.

2. *Шмелев В.Е.* Partial Differential Equations Toolbox. Инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных / http://matlab.exponenta.ru / pde/book1/index.php.

3. *Яловой В.Ф.* Результаты испытания модели устройства для охлаждения анодов магниевого электролизера / В.Ф.Яловой, А.М.Сизоненко, М.М.Николаев и др. // Цветные металлы. 1991. № 6. С.41-44.

Научные руководители: к.т.н. доц. *А.Ю.Фирсов*, д.т.н. проф. *К.П.Власов*