

**УДК 66.045.3****Р.Г. АКМЕН**, к.т.н., профессор

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»)

А.П. ЖЕЛТОНОЖЕНКО, инженер

Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь» (УкрГНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЦИРКУЛЯЦИИ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Рассмотрены вопросы расчета естественной циркуляции воды в системе испарительного охлаждения методической печи и проанализированы перспективы использования математической модели в данном виде расчетов.

математическая модель, система испарительного охлаждения, естественная циркуляция

Методические печи имеют большое количество водоохлаждаемых деталей. Это глассажные и опорные трубы, балки окон загрузки и выгрузки, опорные конструкции ограждения печи. При охлаждении этих деталей технической или химически очищенной водой отбираемая от них теплота теряется безвозвратно. Переход же на системы испарительного охлаждения (СИО) позволяет увеличить коэффициент использования топлива, применяя полученный пар в качестве теплоносителя или как рабочее тело паровых турбин.

Однако, тепло-гидравлические процессы, протекающие в СИО, сложнее, чем в системе охлаждения с использованием технической воды, ввиду отсутствия в последней кипения, что создает дополнительные сложности при расчете СИО, а использование СИО с естественной циркуляцией воды дополнительно усложняет расчет.

Обычно расчет СИО с естественной циркуляцией ведется методом последовательных приближений. Приняв во внимание то, что методика расчета сложна и, кроме этого, приходится выполнять несколько расчетных приближений, становится целесообразным построение математической модели и реализация ее с помощью компьютерной программы. Это позволяет уменьшить время, затрачиваемое на расчет, и увеличить точность расчета.

Опыт эксплуатации уже работающих систем также не может быть перенесен в полной мере на проектируемые СИО в силу того, что работа системы зависит от многих параметров: от конструктивных особенностей системы и от особенностей технологического процесса протекающего в печи.

Основными факторами, влияющим на работу СИО, является тепловая нагрузка на охлаждаемые детали, высота контура и давление в барабане-сепараторе. Величина тепловой нагрузки определяет полезный дви-

жущий напор контура, создаваемый разностью плотностей столбов воды в опускных трубах и пароводяной смеси в подъемных. Увеличение высоты контура при постоянной тепловой нагрузке увеличивает полезный напор, а с ростом давления в барабане-сепараторе увеличивается надежность циркуляции. Тепловая нагрузка может меняться на протяжении кампании в зависимости от многих факторов, основные из которых – это технологический режим работы печи и состояние тепловой изоляции на охлаждаемых деталях. Высота контура – величина постоянная для данной СИО, а вот давление в барабане-сепараторе может меняться в зависимости от необходимого давления греющего пара у потребителей теплоты.

В последнее время находит широкое применение метод математического моделирования процессов и систем, которые описываются определенным набором уравнений различной степени сложности и решаются с помощью различных численных методов. Рассматриваемая математическая модель построена с использованием методики расчета, предложенной УкрГНТЦ «Энергосталь».

Использование математической модели СИО позволяет проводить расчеты естественной циркуляции в сколь угодно широких пределах, варьируя практически любые параметры, влияющие на ее работу. Например, варьируя тепловую нагрузку, можно определить диапазон работы СИО, в котором обеспечивается надежное охлаждение деталей. При поверочном расчете принимаются минимальная, номинальная и максимальная тепловые нагрузки. При росте тепловой нагрузки от минимального до номинального значения и даже немного выше, отмечается наибольший прирост полезного напора в циркуляционном контуре. В этом диапазоне нагрузок сопротивление подъемных

труб растет медленнее, чем уменьшается плотность пароводяной смеси из-за увеличения паросодержания. При дальнейшем росте тепловой нагрузки до максимального значения прирост полезного напора незначителен. Таким образом, при малых тепловых нагрузках в контурах с наибольшим гидравлическим сопротивлением циркуляционный расход может оказаться недостаточным. Это, в свою очередь, может привести к появлению пульсаций в системе и, в конечном счете, к прогару охлаждаемых деталей. При больших тепловых нагрузках недопустимо повышается скорость в подъемном коллекторе, из-за малой плотности пароводяной смеси, что может так же привести к появлению пульсаций в системе и прогару охлаждаемых деталей. Как отмечалось выше, геометрические характеристики системы в значительной мере влияют на ее работу. Таким образом, используя математическую модель, варьируя диаметры и пространственное расположение трубопроводов, можно подобрать циркуляционные контуры таким образом, что их гидравлические характеристики будут близки. Это повысит надежность работы системы и позволит избежать перерасхода металла от использования трубопроводов завышенного диаметра.

В силу сложности математического описания отдельных процессов, протекающих в обогреваемых деталях и подъемных коллекторах системы, возникает необходимость принять некоторые допущения при построении математической модели. В частности, приходится полагать, что поток пароводяной смеси, движущийся по горизонтально расположенным трубам, в особенности по глиссажным, не расслоен на паровую и жидкую фазы, что не всегда выполняется при больших плотностях теплового потока.

На данный момент не представляется возможным учесть скорость скольжения фаз относительно друг друга, кроме как вводя понятие истинного объемного паросодержания. Это также можно отнести к допущениям при построении модели.

И еще одно допущение, о котором стоит упомянуть, – это соблюдение закона Дарси на участках, где имеет место движение пароводяной смеси.

Расчет естественной циркуляции в СИО ведется по расчетной схеме, которая строится в соответствии с конструкцией системы. Исходными данными для расчета являются эксплуатационные характеристики системы (давление в барабане-сепараторе, температура питательной воды, доля постоянной продувки, тепловая нагрузка на каждый циркуляционный контур), диаметры и полные коэффициенты сопротивления каждого трубопровода, высотные отметки точек ветвления (барабана-сепаратора, раздающих и собирающих коллекторов) и обогреваемых деталей.

По исходным данным определяются теплофизические свойства воды и пара в барабане-сепараторе, после чего рассчитывается расход воды через опускной коллектор и его гидравлическое сопротивление. После этого открывается цикл с параметром по количеству групп контуров, объединенных общей групповой подъемной трубой. В каждой из групп выделяется контур с максимальным коэффициентом гидравлического сопротивления, назовем его «контрольный». Полностью рассчитывается контрольный контур, то есть его индивидуальная опускная труба, обогреваемая деталь и индивидуальная подъемная труба. В результате расчета контрольного контура имеем циркуляционный расход воды через него, выход пара и давление среды в первой точке смешения. После этого открывается второй цикл с параметром по количеству неэквивалентных контуров в группе. Расчет этих контуров аналогичен расчету контрольного контура. Разница лишь в том, что для контрольного контура скорость воды на входе в обогреваемую деталь задавалась из условий надежного охлаждения, а для параллельно включенных не эквивалентных контуров группы идет автоматический подбор скорости таким образом, чтобы давление в конце каждого из них равнялось давлению в первой точке смешения. После этого рассчитывается подъемная труба для каждой группы с определением циркуляционного расхода, выхода пара и давления во второй точке смешения. Наконец, рассчитывается подъемный коллектор системы и определяется давление на выходе из коллектора в барабан, при этом, как и для любой точки смешения, невязка по давлению должна быть не более 0,05 бар. При выполнении данного условия можно считать расчет окончанным.

Для определения параметров парожидкостного потока, циркулирующего в контурах, используются следующие уравнения.

Уравнение неразрывности, записываемое в виде

$$G = W\rho S, \quad (1)$$

где G – расход среды, кг/с,

W – скорость среды, м/с,

ρ – плотность среды, кг/м³,

S – площадь поперечного сечения потока, м².

Основной гидравлической характеристикой контура является полный коэффициент гидравлического сопротивления

$$z = \sum (\lambda_0 L + \sum \xi) \quad (2)$$

где z – полный коэффициент гидравлического сопротивления контура;



λ_0 – приведенный коэффициент трения при течении жидкости в трубе, 1/м;

L – длина трубы соответствующего диаметра, м;

$\sum \xi$ – суммарный коэффициент местных сопротивлений.

Давление в любой точке контура может быть определено по формуле

$$P = P_6 + (\rho' h g - \sum \Delta P), \quad (3)$$

где P – давление в искомой точке, Па;

P_6 – давление в барабане-сепараторе, Па;

h – высота столба воды в опускных трубах, м;

ρ' – плотность насыщенной воды при давлении в барабане-сепараторе, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\sum \Delta P$ – сумма сопротивлений всех предварительно включенных участков, Па;

Потери напора на участке движения однофазной среды можно определить по закону Дарси

$$\Delta P = z \frac{\rho' W_0^2}{2}, \quad (4)$$

где W_0 – скорость циркуляции, м/с.

Потери напора на участке движения пароводяной смеси определяются по формуле

$$\Delta P = z \frac{\rho' W_0^2}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \right) \frac{W_{cp}''}{W_0}. \quad (5)$$

где W_{cp}'' – средняя на участке приведенная скорость пара, м/с;

ρ'' – плотность насыщенного пара при давлении в барабане-сепараторе, кг/м³.

Кроме того, имеют место потери на ускорение пароводяной смеси

$$\Delta P_{уск} = \frac{\rho' W_0^2}{2} \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) W''. \quad (6)$$

где W'' – приведенная скорость пара, м/с.

Одним из критериев надежности охлаждения является истинное расходное паросодержание, оно легко определяется по формуле

$$\beta = \frac{\frac{W''}{W_0}}{1 + \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \frac{W''}{W_0}}. \quad (7)$$

Величина недогрева воды до состояния насыщения в контуре, определяемая по формуле

$$Q = G(\Delta h_6' + h_d' - h_6'), \quad (8)$$

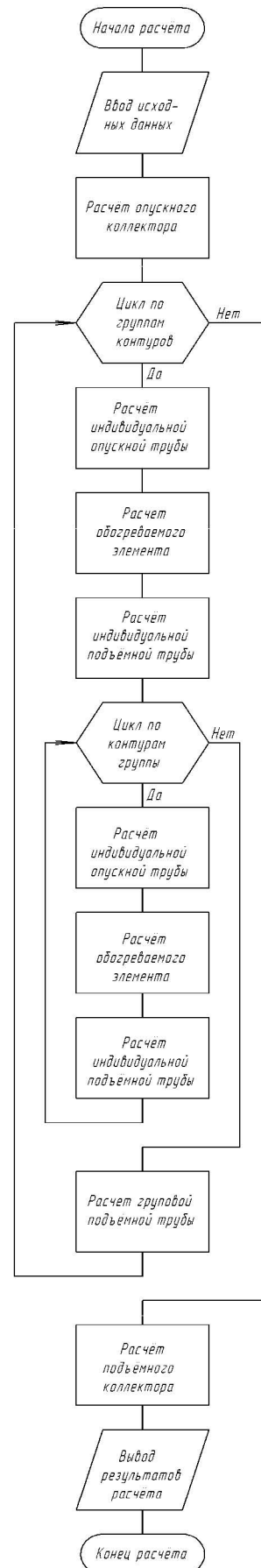


Рисунок 1 – Блок-схема программы (алгоритма)

где $\Delta h'_6$ – недогрев воды до состояния насыщения в барабане-сепараторе, кДж/кг,
 h'_6 – энтальпия насыщенной воды при давлении в барабане-сепараторе, кДж/кг,
 h'_d – энтальпия насыщенной воды при давлении в детали, кДж/кг,
 позволяет легко определить расход пара на выходе из контура

$$D = \frac{Q - Q^*}{r}, \quad (9)$$

где Q – тепловая нагрузка на контур, кВт;
 r – скрытая теплота парообразования при давлении в детали, кДж/кг.

Все вышеприведенные уравнения необходимы для решения основного расчетного уравнения, записываемого в виде

$$P_{дв} - \sum \Delta P = 0, \quad (10)$$

где $P_{дв}$ – движущий напор, создаваемый установкой, Па.

Учитывая, что расчетные схемы установок СИО представляют собой разветвленную систему контуров с одной опускной и одной подъемной трубой, возникает вопрос, какое условие должно выполняться в точках ветвления системы. Из опускных коллекторов ветвление происходит при постоянной температуре, поэтому должно соблюдаться условие сохранения масс в точке ветвления

$$G_1 + G_2 + \dots + G_i = G_k, \quad (11)$$

Розглянуто питання розрахунку природної циркуляції води в системі випарного охолодження методичної печі та проаналізовано перспективи використання математичних моделей у наданому виді розрахунків.

где G_1, G_2, \dots, G_i – расходы среды в индивидуальных контурах, кг/с,

G_k – расходы среды в коллекторе, кг/с;

В подъемном контуре, когда в точку ветвления могут приходиться потоки с разной энтальпией, к условию равенства масс должно быть добавлено условие равенства полных энтальпий

$$G_1 h_1 + G_2 h_2 + \dots + G_i h_i = G_k h_k, \quad (12)$$

где h_1, h_2, \dots, h_i – энтальпия потока в индивидуальных контурах, кДж/кг,

h_k – энтальпия потока в коллекторе, кДж/кг.

Отметим, что особенностью данной математической модели является то, что выполнения условия во второй точке смешения добиваются нахождением комбинации скоростей воды в контрольных контурах. Блок-схема программы представлена на рис. 1.

Таким образом, применение математической модели при расчете СИО с естественной циркуляцией позволяет:

- определить диапазон работы установки, в котором обеспечивается надежное охлаждение деталей;
- диагностировать состояние тепловой изоляции на охлаждаемых элементах;
- оптимизировать металлоемкость системы испарительного охлаждения на стадии ее проектирования.

Поступила в редакцию 28.01.2009

The article concerns the questions of calculating natural circulating water in evaporative cooling system of continuous furnace and analysis of prospects of using the mathematical model in these calculations.