УДК 621.036.7

И.А. ИВАХНЕНКО, канд. техн. наук, Одесский национальный политехнический университет,
Т.Н. ИВАХНЕНКО, Одесская национальная морская академия

О ГРАФИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОТЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ВОДОЙ В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И (ИЛИ) РАБОЧЕГО ТЕЛА. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

Приводиться інформація, необхідна і достатня для графічного моделювання роботи теплотехнічного устаткування в системі координат ST за допомогою таблиць теплофизических властивостей води і водяної пари.

The information that is necessary and sufficient for graphic modeling of heat engineering equipment work in ST system of coordinates with the help of the tables of thermalphysic properties of water and water vapor has been given.

Планируется написать несколько работ, включающих описание составления и анализа графических моделей работы теплотехнического оборудования, в частности, паротурбинных установок в различных режимах их эксплуатации.

Использование графических моделей работы теплотехнического оборудования позволяет углублять знания о нем, полезные как для его проектирования так и для его эксплуатации. Настоящая работа является первой в планируемом ряду и включает общие положения. необходимые для решения поставленной задачи.

Названные модели давно и успешно используются, в частности, для подготовки специалистов в области проектирования и эксплуатации теплотехнических установок. К ним относятся модели работы турбин в HS и TS диаграммах, так называемые «процессы в турбинах»,термодинамические циклы, TQ – диаграммы процессов в теплообменном оборудовании и др. Новизной данной работы не является использование графических моделей работы, вообще, новизна состоит в использовании графических моделей работы всего теплотехнического оборудования той же паротурбинной установки для понимания её работы в предусмотренных режимах эксплуатации.

Работа теплотехнического оборудования в любом стационарном состоя-

нии, в большинстве случаев, может моделироваться с помощью моделей трех хорошо известных термодинамических процессов: изобарного (P = const.), изоэнтропийного (S = const.) и процесса дросселирования (h = const.).

Изобарный процесс и его графическая модель. Проведем мысленный эксперимент. Поместим 1 кг жидкой воды в прозрачный сосуд, накроем её поршнем так, чтобы он прилегал к воде (без воздушного зазора). Поршнем будем действовать на воду силой и, таким образом, создавать в ней давление, например, 0,1 МПа. Предположим, что поршень – герметический. Описанная конструкция в описанном состоянии изображена на рис. 1, в части рисунка «а». Пусть, начальные термодинамические параметры воды характеризуются значением температуры T_0 = 20 °С и энтропии – S_0 = 0,3 кДж/(кг·град). В процессе эксперимента будем подводить к воде теплоту (Q) и измерять ее температуру (Т). Количество подводимой теплоты будем определять по параметрам источника теплоты, с учетом способа передачи теплоты воде, точнее говоря, коэффициента полезного действия (КПД). Например, если источником теплоты является электронагреватель, а способом ее передачи – погружение электронагревателя в воду, тогда, обсуждаемое количество теплоты определяется параметрами электрического тока и временем работы нагревателя, а КПД, равный отношению количества теплоты, переданной воде к количеству теплоты, полученной в нагревателе, может быть величиной, близкой к единице. Итак, начинаем эксперимент. Время: $^{2} = ^{2}{}_{0}$. Теплота пошла.

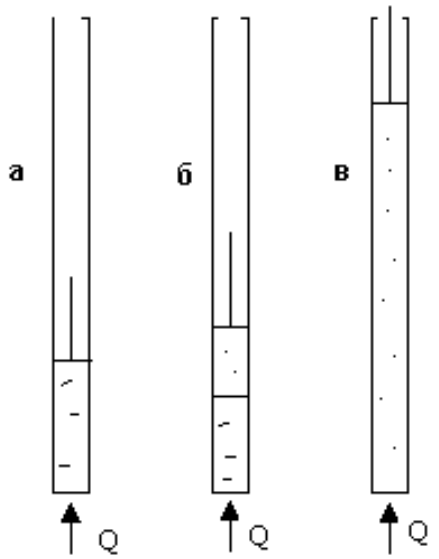

Рис. 1. Изобарный подогрев воды:

а – подогрев без кипения; б – кипение; в – перегрев пара.

Через некоторый промежуток времени, в момент времени $\tau_2 = \tau_1$ мысленно останавливаем эксперимент. При этом имеем измеренные значения температуры и теплоты: T = T_1 ; Q = Q_1. Изобарный подогрев воды в обсуждаемых условиях, равно как и ее охлаждение, хорошо моделируются вторым законом термодинамики [1], записанным для обратимых процессов:

$$dS = \frac{dQ}{T}; \tag{1}$$

здесь T – температура, ^0K . Преобразуем (1), получим:

$$TdS = dQ; \tag{2}$$

проинтегрируем (2) от условий, соответствующих началу первого шага эксперимента, до условий, соответствующих его концу:

$$\int_0^1 TdS = Q_1 - Q_0; \tag{3}$$

Легко показать, что, если T(S) – линейная функция, тогда из (3) получим:

$$\frac{T_0 + T_1}{2}(S_1 - S_0) = Q_1 - Q_0 \ ; \tag{4}$$

обозначим: $S_1 - S_0 = \Delta S_{01}$; $Q_1 - Q_0 = Q_{01}$; $\frac{T_0 + T_1}{2} = T_{01}$, после преобразования из (4) получим:

$$\Delta S_{01} = \frac{Q_{01}}{T_{01}}. \tag{5}$$

По формуле (5) определим ΔS_{01}, а зная S_0, с учетом принятого обозначения, определим S_1. В системе координат ST на рис. 2 построим точку с координатами: $S_1 T_1$. Продолжим мысленный эксперимент. Рассуждая аналогично тому, как рассуждали в его первой части, получим точку 2 с координатами $S_2 T_2$. Соединим точки 0, 1 и 1, 2 отрезками, получим график функции T(S) в известном диапазоне значений энтропии, как это показано на рис. 2.

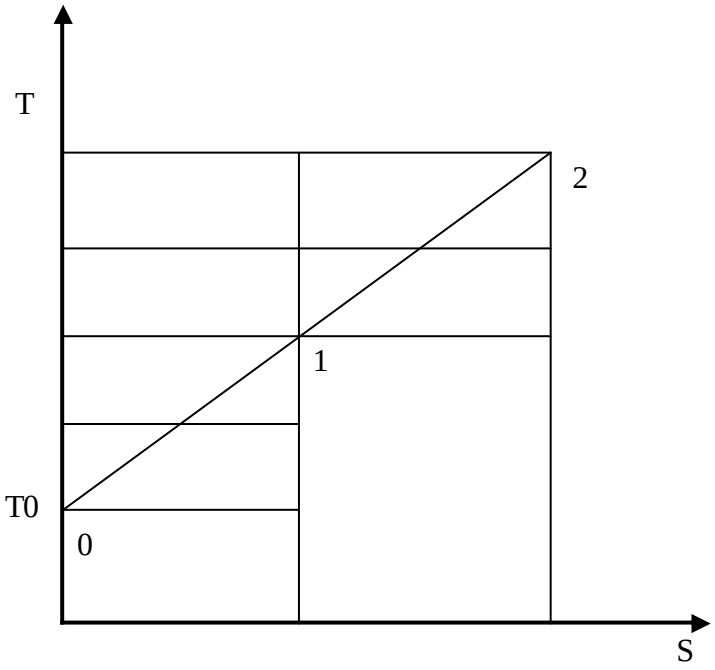

Рис. 2. К построению диаграммы T(S) при изобарном подогреве воды.

Если мы продолжим наш эксперимент, строя при этом график T(S) и будем при этом наблюдать за сосудом с водой, то увидим следующее. В диапазоне значений температуры $T \in [20^0C;100^0C)$ вода заметно не изменяет свой объем, она остается в жидком состоянии. Данной части эксперимента соответствуют часть «а» на рис. 1, рис. 2 и рис. 3 часть графика 1 – 2. В диапзоне изменения энтропии от 0,3 до 7,36 (кДж/кг·град) температура остается равной 100^0C, вода в сосуде кипит – там появился уровень, часть воды находится в жидком, а часть – в газообразном состоянии. Поршень поднимается над уровнем воды – объем воды под поршнем заметно увеличивается. Данной части эксперимента соответствуют часть «б» на рис. 1 и часть графика 2 – 3 на рис. 3. В диапазоне значений температуры от 100^0C и более (максимально допустимое значение температуры здесь не обсуждаем) уровня воды нет - в сосуде – перегретый пар, его объем продолжает расти, осуществляется перегрев воды.

Данной части эксперимента соответствуют часть «в» на рис. 1, и часть графика 3 – 4 на рис. 3.

Одной из задач вышеизложенного было показать физическую сущность понятия (термодинамического параметра) энтропии относительно изобарного процесса, её роль (значение) при его моделировании.

Запишем (5) в виде:

$$Q_{ab} = T_{ab}\Delta S_{ab}; \qquad (6)$$

здесь индексы «a» и «b» обозначают отношение к началу и окончанию изобарного процесса. Выражение справедливо, с учетом указанных выше ограничений – не влияющих на физическую сущность энтропии в данном процессе. В соответствие с последним выражением, полученным из второго начала термодинамики для обратимых процессов, энтропия – величина, изменение которой вместе с температурой определяют количество подведенной или отведенной в изобарном процессе теплоты. Положительный знак изменения– соответствует подводу теплоты к воде. Отрицательный – отводу.

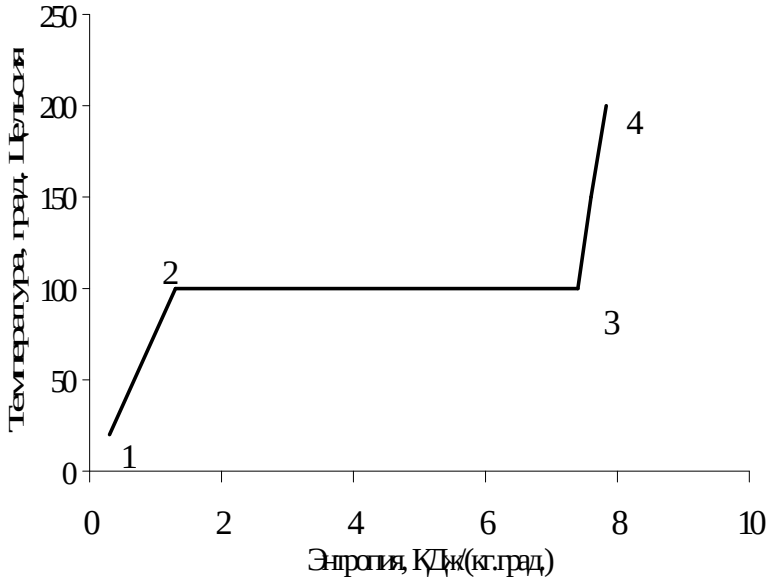

Рис. 3. Изобарный подогрев воды при Р – 0,1 МПа:
1 – 2 – подогрев без кипения; 2 – 3 – подогрев с кипением;
3 – 4 – подогрев с перегревом пара.

Особенность состояния воды, изображенного на части «б» рисунка 1 – наличие уровня жидкой фазы – видимой границы раздела фаз. Жидкая вода (вода под уровнем раздела фаз) называется водой на линии насыщения. Она характеризуется параметрами термодинамического состояния в точке 2 на рисунке 3. Вода над уровнем раздела фаз – газообразная вода – называется (пренебрегая жидкой водой, присутствующей в ней во взвешенном состоянии) сухим насыщенным паром – с параметрами в точке 3 на том же рисунке.

Часто, в условиях работы энергетического оборудования (сопел, редукционных и многих других устройств) пар и жидкая фаза воды, в соотношениях, соответствующих состоянию, изображенному на части «б» рисунка 1,

практически, равномерно перемешаны, жидкая фаза мелкими образованиями находится в паровой фазе во взвешенном состоянии. Такая смесь, термодинамически, в приемлемом приближении, эквивалентная состоянию на указанной части рисунка, называется влажным паром. Таким образом, влажный пар – смесь воды на линии насыщения (насыщенной воды) и сухого насыщенного пара.

Изобарный процесс является моделью процесса теплообмена во всех теплообменниках, за исключением тех, где специальными техническими решениями изменяют давление среды в процессе теплопередачи.

Чтобы строить графические модели термодинамических процессов, нужно иметь графические модели термодинамических состояний воды и водяного пара. Это следует из того, что термодинамический процесс можно представить, как переход из одного состояния в другое и так далее. Если нам удастся построить графические модели состояний, тогда графическая модель процесса будет иметь вид переходов (отрезков) от одной модели состояния к другой и так далее.

Графические модели термодинамических состояний могут быть представлены первым квадрантом системы координат ST, где каждая точка плоскости квадранта характеризуется своими координатами и, соответственно, параметрами S и T. Как известно из термодинамики, два любых параметра из перечня – температура, давление, энтропия, удельный объем и энтальпия – определяют все остальные.

Эти модели можно сделать более содержательными, если сходственные каким-нибудь признаком между собой точки (модели состояний) на поле квадранта соединить между собой , в общем случае, кривыми линиями. Из всех признаков, определяющих сходство точек мы выберем следующие:

- идентичность давления;

- начало фазового перехода из жидкого состояния в парообразное, при подводе теплоты или, соответственно, окончание конденсации пара – превращения парообразной фазы в жидкую, при отводе теплоты от воды. Такому состоянию соответствует точка 2 на рисунке 3;

- окончание фазового перехода из жидкого состояния в парообразное, при подводе теплоты или, соответственно, начало конденсации сухого насыщенного пара – превращения парообразной фазы в жидкую, при отводе теплоты от воды. Такому состоянию соответствует точка 3 на том же рисунке.

Пример моделей состояний с указанными добавлениями изображен на

рисунке 4. На рисунке изображены следующие области состояний: 1 – закритическая и 2 – докритическая. Вторая включает в свой состав области: жидкой воды 2.1, влажного пара (пароводяной смеси) 2.2 и перегретого пара 2.3. Точку К на поле квадранта называют критической точкой, а параметры термодинамического состояния, которые ей соответствуют – критическими. Линию АК называют линией насыщения при массовом паросодержании (х) воды х = 0. Линию КБ – называют также, но при х = 1, линию АКБ – называют пограничной кривой. Изобару, проходящую через критическую точку, называют критической изобарой.

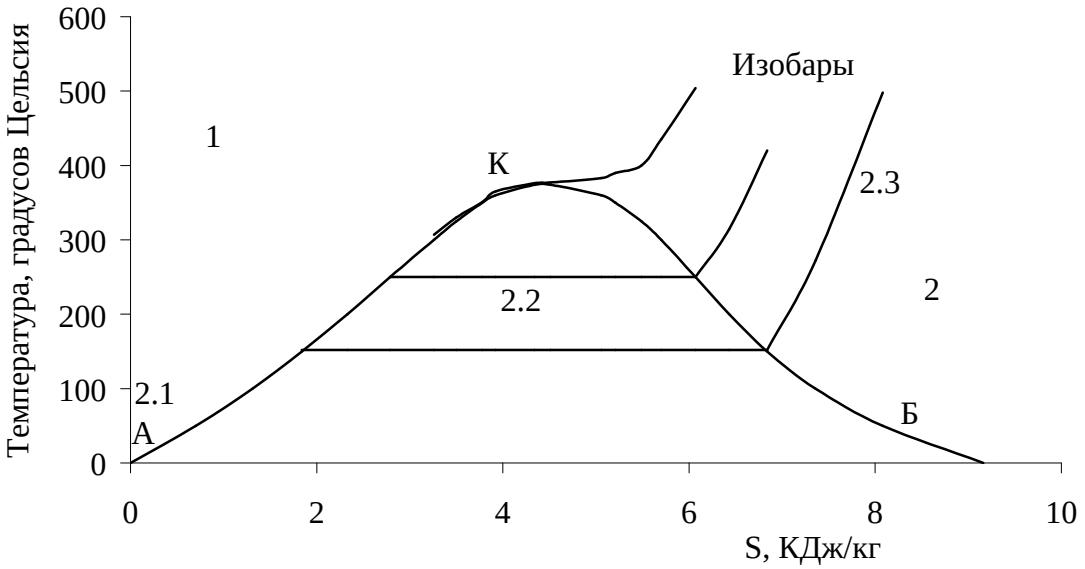

Рис. 4. Графическая модель термодинамических состояний воды и водяного пара

Теперь мы можем более точно определить части квадранта и соответствующие характерные состояния воды и водяного пара.

Область закритического состояния – часть плоскости квадранта над критической изобарой. Область докритического состояния – часть плоскости квадранта под ней. Область жидкой воды – часть плоскости квадранта между критической изобарой и линией насыщения АК. На рисунке она имеет вид линии, что соответствует принятому масштабу графического моделирования. Область влажного пара – поверхность под линией насыщения АКБ. Область перегретого пара – поверхность, ограниченная слева критической изобарой и линией насыщения КБ.

Описанная здесь модель термодинамических состояний, является частью, известной в термодинамике, TS-диаграммы, которая широко используется в энергетике.

Параметры для всей области TS-диаграммы рассчитываются с помощью известной математической модели воды и водяного пара. На сегодняшний день пользоваться такой модельный для получения интересующих параметров во многих условиях, например, в условиях учебных заведений, энергетического производства, считается сложным. Расчетные значения параметров приводят в табличном виде и в виде диаграмм, например, в литературе [2]. Ниже будем говорить о графическом моделировании с помощью табличных данных. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара будем называть, сокращенно, таблицами.

Особенностью табличного представления данных является следующее:

- в них не приводят данные (термодинамические параметры) воды и водяного пара под пограничной кривой;

- данные представляются дискретно.

Предполагается, что по приведенным численным значениям пользователь сумеет, с достаточной точностью, вычислить параметры в любой точке указанной области состояний или, что, по существу, одно и то же – вычислить все параметры по заданным численным значениям любой их пары.

Изоэнтропийный процесс и его графическая модель. Физической моделью данного процесса, с большой степенью точности, можно считать словесное описание сжатия воды с помощью поршня в условиях на рисунке 1 или его расширения без теплообмена с окружающей средой. Приближенность модели, в данном случае, обусловливается конечной скоростью сжатия (расширения) и теплообменом с окружающей средой. Однако степень приближения, приведенного в качестве примера, процесса к изоэнтропийному достаточно велика.

Математической моделью изоэнтропийного процесса является уравнение: S = const. Из данного уравнения с помощью известных физических закономерностей можно получить математическую зависимость любых термодинамических параметров в данном процессе.

Графические модели вариантов процесса приводятся на рисунке 5 – это вертикальные отрезки на поле диаграммы. Выполним анализ приведенных на рисунке моделей.

Они характеризуются начальными и конечными параметрами. Соответственно, они характеризуются различным состоянием воды до и после осуществления процесса. Последнее определяется местом проведения процесса на диаграмме, его направлением, степенью изменения давления в процессе.

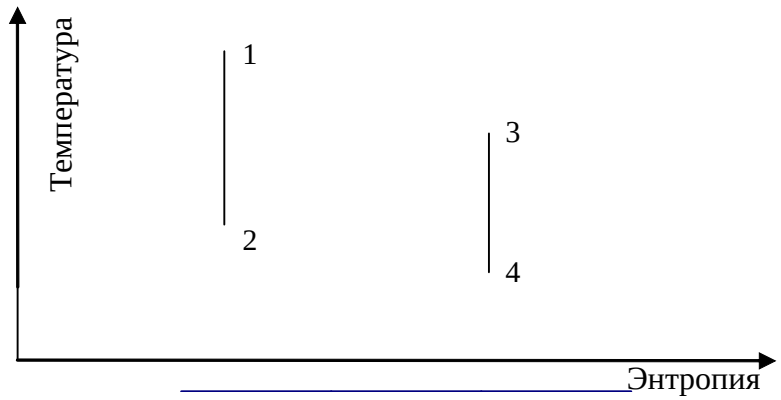

Рис. 5. Графические модели изоэнтропийных процессов

Для осуществления изоэнтропийного процесса нужно:

- иметь техническое устройство, способом работы которого является осуществление данного процесса;

- сохранять требуемые термодинамические параметры на входе в устройство и выходе из него.

Процесс, близкий к изоэнтропийному, являются способом работы, в частности, насосов и сопловых решеток турбин.

Процесс дросселирования (изоэнтальпийный процесс) и его графическая модель. Как известно, процесс дросселирования является необратимым термодинамическим процессом [1].

Его физическая модель, с определенным приближением, может быть представлена течением жидкости или газа через местное сопротивление таким образом, что:

- на местном сопротивлении уменьшается давление;

- скорость вещества до и после сопротивления остаётся одинаковой;

- нет теплообмена с окружающей средой.

Математическая модель процесса дросселирования (изоэнтальпийного процесса) имеет вид: h = const. Пример графической модели дросселирования приводятся на рисунке 6, это кривая АБ.

Проанализируем приведенную модель, а вместе с ней, с определенным приближением, и некоторый реальный процесс, моделируемый данным.

Для осуществления процесса нужно соответствующее техническое устройство, способом работы которого является осуществление процесса, моделируемого данным, а также сохранять соответствующие термодинамические параметры на входе в устройство и выходе из него.

Осуществлением данного процесса можно изменять термодинамическое состояние рабочего тела (дросселируемой среды), например, от жидкого до влажного пара, от влажного до перегретого.

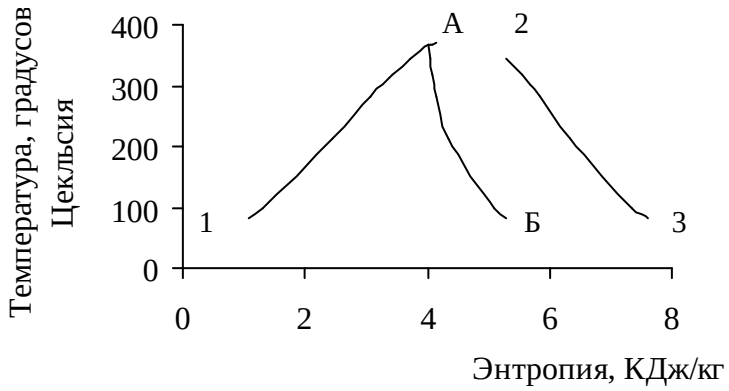

Рис. 6. Графическая модель дросселирования:
1 – А и 2 – 3 – части пограничной кривой; А – б – изоэнтальпия.

При дросселировании в области жидкой фазы воды температура последней, практически, не изменяется.

Термодинамические процессы, моделируемые дросселированием, являются способом работы редукционных устройств, вентилей, дроссельных шайб и многих других.

Интерполяция по параметрам, заданным в таблицах, например, [2] в качестве аргументов функций. Рассмотрим содержание рисунка 7.

На рисунке изображена точка 5 в система координат P, T, где P и T – давление и температура. Точка 5 задана своими координатами – P_5 и T_5. Допускаем, что значения термодинамических параметров состояния воды в точке 5 – параметров, соответствующих заданным значениям P_5 и T_5, в таблицах не приводятся.

На рисунке 7, точки 1, 2, 3, и 4 – это графические модели таких термодинамических состояний воды, для которых в таблицах приводятся все численные значения термодинамических параметров, причем, температура и давление являются аргументами, а другие параметры (v, h, S) – функциями (v – удельный объем, $м^3$/кг). Указанные точки выбраны таким образом, что, соответствующие им, численные значения температуры и давления являются наиболее близкими к численным значениям одноименных параметров в точке 5 – слева и справа, снизу и сверху точки 5 в системе координат на рисунке.

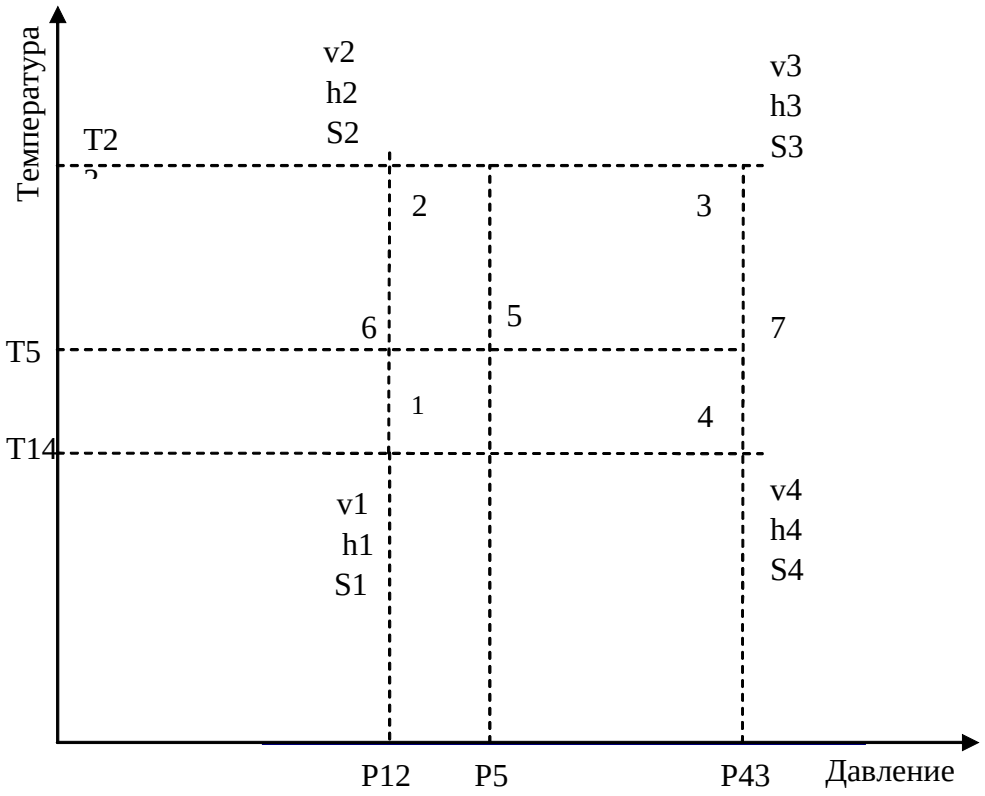

Рис. 7. Графические модели термодинамических состояний воды 1, 2, 3, 4 и 5 в системе координат PT.

Ниже принят следующий порядок записи индексов в обозначениях разности (Δ) величин: сначала указывается индекс большей величины – уменьшаемого, затем – меньшей величины – вычитаемого.

Рассмотрим содержание рисунка 8.

Рисунок построен преобразованием предыдущего рисунка.

По оси ординат откладываются значения искомой функции – одного из искомых параметров термодинамического состояния в точке 5. В качестве такового на рисунке используется удельный объем воды.

Точки 1, 2, 3, и 4 моделируют термодинамическое состояние воды в данной системе координат. Им соответствуют прежние, как и на рисунке 7, табличные значения давления и объема. Вспомним, что нашей задачей является найти, по заданным P и T, численные значения остальных параметров, в том числе, удельного объема.

При построении рисунка было принято, что кривые T = const. – параллельны. Последнее тем более справедливо, чем ближе друг к другу модели рассматриваемых состояний. Принимается, что, в условиях принятых размеров ячейки, справедливы соотношения:

$$\frac{\Delta v_{26}}{\Delta v_{21}} = \frac{\Delta v_{37}}{\Delta v_{34}} = K_P; \qquad (7)$$

где (смотрите рисунок 7)

$$K_P = \frac{\Delta T_{26}}{\Delta T_{21}}. \qquad (8)$$

С помощью последних выражений легко определить v_6 и v_7.

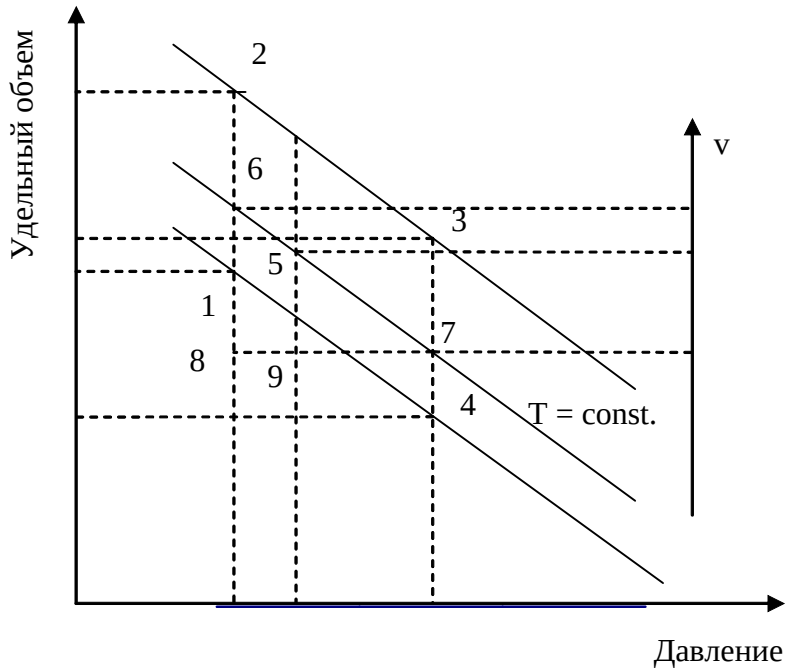

Рис. 8. Графические модели термодинамических состояний воды 1, 2, 3, 4 и 5 в системе координат Pv

Из подобия треугольников следует:

$$\frac{\Delta P_{79}}{\Delta P_{78}} = \frac{\Delta v_{57}}{\Delta v_{67}} = \frac{\Delta v_{59}}{\Delta v_{68}} = K_T; \qquad (9)$$

где (смотрите рисунок 7)

$$K_T = \frac{\Delta P_{45}}{\Delta P_{41}}. \qquad (10)$$

Здесь K_T и K_P – коэффициенты пропорциональности при постоянных T и P, соответственно; ΔP_{IJ} и ΔT_{IJ} обозначают разность соответствующих координат с учетом принятого выше правила выбора уменьшаемых и вычитаемых.

Используя приведенные соотношения, легко определить удельный объем в точке 5 (v_5). Аналогично можно определить любой искомый параметр состояния воды в точке 5 : h и (или) S.

Ниже рассмотрим экстраполяцию.

Экстраполяция, по параметрам, заданным в таблицах в качестве аргументов функций. Рассмотрим содержание рисунка 9. Рисунок аналогичен рисунку 7, с той лишь разницей, что точка 5 находится вне прямоугольника, образованного точками 1, 2, 3, 4.

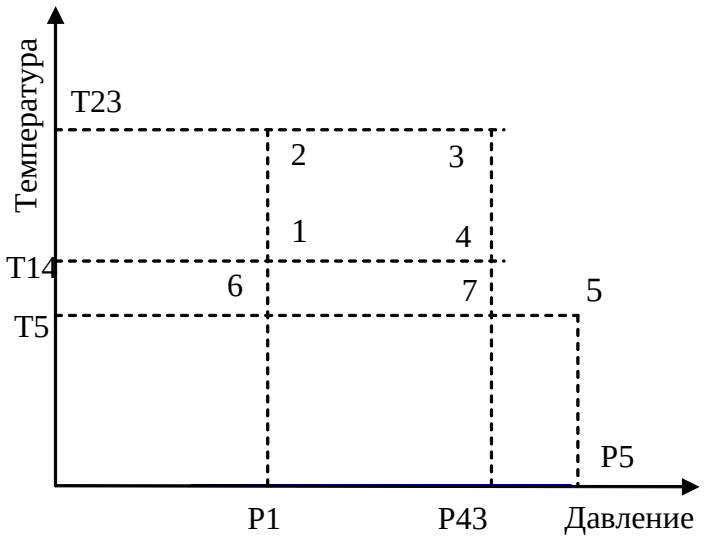

Рис. 9. Графические модели термодинамических состояний воды 1, 2, 3, 4 и 5 в системе координат PT

Рассмотрим содержание рисунка 10. Он аналогичен рисунку 8, с той разницей, что точка 5 находится вне параллелограмма, образованного точками 1, 2, 3, 4. Рассуждая аналогично, как относительно рисунка 8, получим выражения, аналогичные выражениям (7), (8), (9) и(10):

$$\frac{\Delta v_{26}}{\Delta v_{21}} = \frac{\Delta v_{37}}{\Delta v_{34}} = \frac{\Delta T_{26}}{\Delta T_{21}} = K_P. \qquad (11)$$

Последние соотношения позволяют определить удельный объем в точ-

ках 6 и 7. И далее, с учетом подобия треугольников:

$$\frac{\Delta v_{79}}{\Delta v_{68}} = \frac{\Delta v_{75}}{\Delta v_{65}} = \frac{\Delta P_{59}}{\Delta P_{58}} = K_T . \qquad (12)$$

Последнее выражение позволяет определить удельный объем в точке 5.

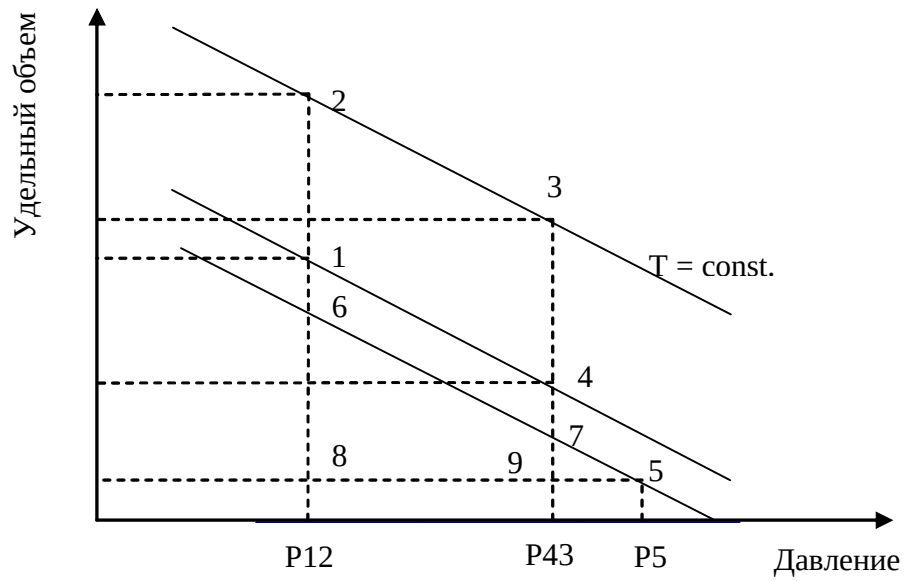

Рис. 10. Графическая модель термодинамических состояний воды: 1. 2. 3. 4. и 5 в системе координат Pv

Определение термодинамических параметров состояния по заданным значениям двух параметров, которые, во-первых, в таблицах используются в качестве функций и, во-вторых, численные значения которых в таблицах не приводятся. Пусть задано состояние, обозначим его «3» , координатами S_3 и h_3 в системе координат Sh на рисунке 11. Требуется определить с помощью табличных данных другие (P, v, T) параметры данного состояния.

Делаем это так:

1) выбираем в таблицах состояния «1» и «2» с координатами S_1, h_1 и S_2, h_2 так, что $S_1 < S_3 < S_2$ и $h_1 < h_3 < h_2$.

2) Строим все состояния (точки 1, 2, 3) в системе координат Sh.

3) Строим линии изобар P_1 = const. и P_2 = const. Принимаем, что в достаточно маленькой области поля системы координат они являются параллельными.

4) Строим треугольник 124.

5) Переносим его , как показано на рисунке, в положение 11 22 44.

6) Принимая линейную зависимость давления от расстояния между изобарами на рисунке.

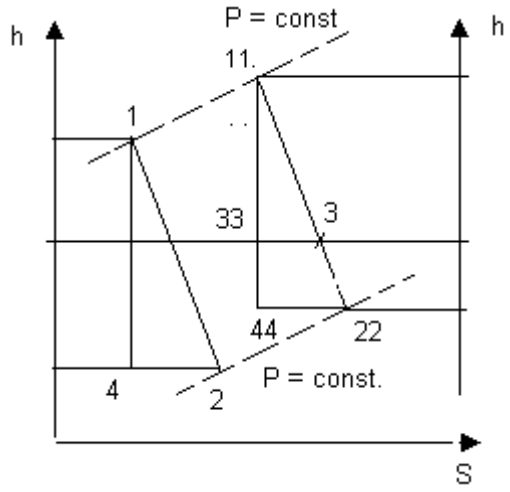

Рис. 11. Графические модели термодинамических состояний воды 1, 2 и 3 в системе координат Sh.

Для полученного треугольника можем записать:

$$\frac{\Delta P_{113}}{\Delta P_{1122}} = \frac{\Delta h_{1133}}{\Delta h_{1122}} \rightarrow \frac{\Delta P_{13}}{\Delta P_{12}} = \frac{\Delta h_{13}}{\Delta y_{12}}. \qquad (13)$$

Последнее выражение позволяет определить неизвестный параметр, в данном случае, давление, посредством интерполяции. Можно показать, что оно же справедливо и в том случае, когда состояние 3, моделируется точкой, лежащей вне плоскости ограниченной изобарами P_1 = const. и P_2 = const., т.е., при экстраполяции. Аналогично давлению, с его помощью могут быть определены и температура в точке 3 и удельный объем воды.

Как определять с помощью таблиц термодинамические параметры влажного пара. Как отмечалось, в таблицах термодинамические параметры пароводяной смеси (влажного пара) не приводятся. Эта область термодинамических состояний вещества (воды) графически моделируется, например, в системе координат ST, плоскостью системы, ограниченной пограничной кривой (смотрите, например, рисунок 4). Предполагается, что пользователь сумеет самостоятельно, в случае необходимости, определить термодинамические параметры интересующего состояния в указанной области. Ниже мы рассмотрим способы определения параметров и паросодержания (степени

сухости) влажного пара. Чтобы определить параметры некоторого состояния, оно должно быть определено. Иными словами, должна быть задана пара координат, например, в системе координат ST. Такой парой не могут быть давление и температура, так как ей соответствует большое число точек, расположенных на графике T = const. или P = const. К таким парам могут относиться любые, которые определяют только одну точку в используемой системе координат. Это могут быть пары: S, T; S,h; S, P; T,h; T,x; P,x (x – степень сухости влажного пара) и другие.

Данное термодинамическое состояние (моделируемое данной точкой) может быть некоторым промежуточным состоянием изобарного процесса, для которого, с приемлимой степенью точности, справедливы следующие законы и следствия из них.

Первый закон термодинамики для обратимых процессов:

$$dQ = dh - vdP; \tag{14}$$

из него для изобарных процессов (P = const.) получаем: dQ = dh и, после интегрирования от начала некоторого процесса (1) до его окончания (2), получим:

$$Q_{12} = \Delta h_{12}. \tag{15}$$

Второй закон термодинамики: dQ = TdS после интегрирования в тех же границах, с учетом, что в данной области термодинамических состояний, при изобарном процессе – T = const., получим:

$$Q_{12} = T\Delta S_{12}. \tag{16}$$

Из последних выражений получим $T\Delta S_{12} = \Delta h_{12}$.

Ниже займемся определением степени сухости.

На рисунке 12 изображена графическая модель кипения воды при подводе к ней теплоты при изобарном процессе. Данная модель соответствует части «а» на рисунке 1 и части ломаной 23 на рисунке 3.

По оси абсцисс откладывается масса (m) образующегося пара воды, по оси ординат – количество подводимой теплоты (Q). На рисунке m_1 равно массе жидкой фазы воды в начале процесса.

Представленную графическую зависимость можно отобразить аналитической: Q = qm, где q – количество теплоты, необходимое для преобразова-

ния единицы массы воды из жидкого состояния в парообразное, дж/кг. Для точек 1 и t на рисунке последнее выражение принимает вид: $Q_1 = qm_1$; $Q_t = qm_t$.

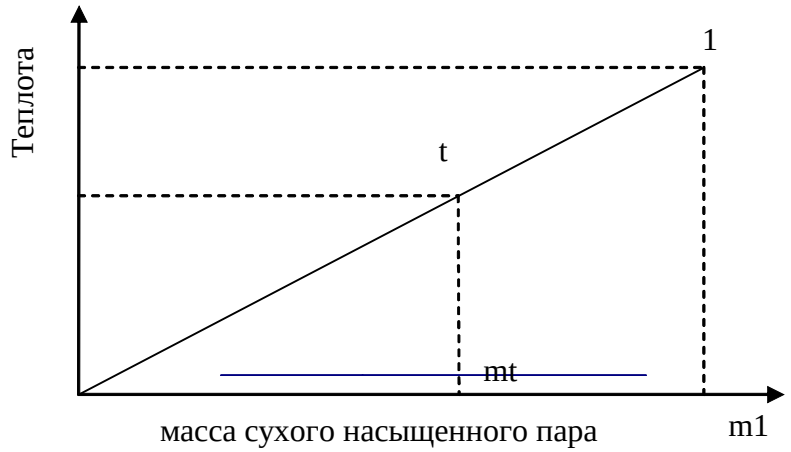

Рис. 12. Зависимость количества теплоты, необходимого для образования сухого насыщенного пара от его массы при P = const.

Разделим почленно последнее выражение на предпоследнее, получим:

$$\frac{Q_t}{Q_1} = \frac{m_t}{m_1}. \qquad (17)$$

По определению степени сухости:

$$x = \frac{m_t}{m_{CM}}; \qquad (18)$$

но $m_{CM} = m_1$. Тогда, с учетом (18) и (17), получим:

$$x = \frac{Q_t}{Q_1}. \qquad (19)$$

Как определить удельный объем влажного пара. Обратимся к состонию, соответствующему части «б» на рисунке 1. Допустим, что в сосуде вода в жидкой фазе в массовом количестве m_a с удельным объемом v_a, а в парообразной фазе – в массовом количестве m_b и с удельным объемом v_b, тогда удельный объем смеси в сосуде можно представить:

$$v_{CM} = \frac{v_a m_a + v_b m_b}{m_a + m_b};$$

или

$$v_{CM} = v_a(1-x) + v_b x. \qquad (20)$$

Выше мы получили четыре выражения: (15), (16), (19) и (20), которые являются расчетными для определения параметров влажного пара под пограничной кривой.

О приеме, который мы будем использовать при графическом моделировании работы теплотехнического оборудования. Как известно, на используемых в энергетике диаграммах, в частности, в системе координат ST, термодинамическое состояние жидкой воды моделируется линиями изобар, расположенными на диаграмме настолько близко друг от друга, что, практически, изображаются одной линией, совпадающей с пограничной кривой. Изменение масштаба изображения численных значений энтропии и (или) температуры с целью увеличения расстояния между изобарами до различимых размеров, приводят к неприемлимому увеличению размеров диаграммы, в целом. Иными словами, область жидкой фазы воды, во всяком случае, в той области параметров, которая в настоящее время используется в энергетике, моделируется одной кривой. Эта кривая обозначена 123 К на рисунке 13. Ниже, части изобар, расположенные в области жидкой фазы воды, будем называть левыми ветвями изобар. На рисунке часть изобары 12, является ее (изобары) левой ветвью.

В то же время, большое число теплотехнических устройств (теплообменники, насосы, редукционные устройства и др.) работает и с жидкой водой. Указанная особенность, упомянутых выше диаграмм привела к тому, что в нашей стране, практически, отсутствуют графические модели работы оборудования в ST-координатах, где используется жидкая вода.

Указанный недостаток TS – диаграмм, может быть устранен использованием в них не двух масштабов (для изображения численных значений температуры и энтропии по осям ординат и абсцисс), а трех. Третий масштаб используется только для изображения численных значений энтропии состояний, моделируемых левыми ветвями изобар. Этим левые ветви изобар приподнимаются, как показано на рисунке 13, и занимают положение, например, линий 43 или 52 вместо 13 и 12, соответственно. Ниже левые ветви изобар в

«новом» положении будем называть образами левых ветвей изобар, а левые ветви изобар в «нормальном» положении, будем называть их оригиналами.

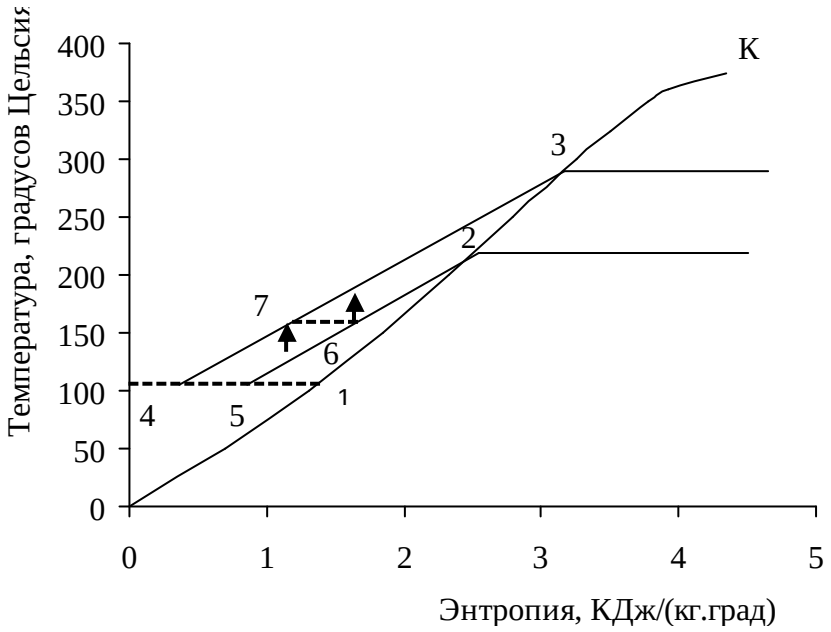

Рис. 13. Модель термодинамического состояния воды в системе координат ST с увеличенным масштабом S-координаты в области жидкой фазы

Совместное использование двух масштабов для отображения энтропии обуславливает тот недостаток, что мы теряем возможность:

- с помощью образа левой ветви определить графически численные значения энтропии ее точек ;

- построить графическую модель изоэнтропийного процесса в привычном виде, как это изображается на рисунке 5.

Указанные недостатки могут быть устранены следующим образом:

- численные значения энтропии, соответствующие, например, некоторым значениям температуры, для образа левой ветви изобары могут быть легко определены с помощью ее оригинала по этим же значениям температуры;

- изоэнтропийный процесс мы будем изображать (моделировать) парой стрелок, например, 6 и 7 на рисунке 16, где стрелка 6 обозначает параметры начала процесса, в данном случае, сжатия и его направление, а стрелка 7 – параметры его окончания и направление процесса.

Описанный выше прием позволяет расширить область графического моделирования работы теплотехнического оборудования от области термоди-

намических параметров водяного пара и частично воды до области воды и водяного пара. Позволяет увеличить информационную емкость графических моделей и степень их приближения к реальным процессам.

Список литературы: 1. *Дрыжаков Е. В. и др*. Техническая термодинамика. Москва. Издательство «Высшая школа». 1971. **2.** *М. П. Вукалович, С. Л. Ривкин, А. А. Александров.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Москва. «Издательство стандартов». 1969.

Поступила в редколлегию 18.10.07

УДК 66.074

И.В. ПИТАК, асп., ***А.Г. ТРОШИН***, канд. техн. наук,
В.Ф. МОИСЕЕВ, канд. техн. наук, ***А.В. СУРКОВ***, студент, НТУ “ХПИ”

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РОТОРНОГО МАССООБМЕННОГО АППАРАТА

В статі описана конструкція апарату з тороідальним контактним елементом, який дозволяє значно підвищити ступінь абсорбції або пилоочистки завдяки високому ступеню турбулізації реакційних потоків.В статті наведена гідравлічна характеристика роторного вихрового апарату і представлена візуалізація потоку.

In the article the design of the vehicle with a doughnut contact member is described, which one allows considerably to increase a degree of absorption and газооочистки due to a high scale of burble of reactionary flows. In the article the hydraulic characteristic of the rotor vortical vehicle is adduced and the rendition of a flow is submitted.

В процессе своего развития химическая промышленность столкнулась с необходимостью решения ряда проблем, а именно, необходимостью поддержания чистой окружающую среду, сокращения расходов энергии при проведении отдельных процессов и т.п. В связи с этим возникла задача разработки новых способов получения химических продуктов, усовершенствование процессов с целью сокращения энергозатрат, снижение расхода и утилизации сырьевых компонентов [1].

Большое внимание следует уделять разработке и производству новых совершенных конструкций оросителей, которые обеспечивали бы равномер-