УДК 536.46:532.517.4

*А. С. АСКАРОВА, С. А. БОЛЕГЕНОВА, М. Т. БЕКЕТАЕВА, Г. К. МУКАШЕВА*

(Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан)

# АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ КОНТУРЕ ПАРОВОГО КОТЛА МЕТОДОМ ХАРАКТЕРИСТИК ДАВЛЕНИЯ

**Аннотация.** Развитие современной теплоэнергетики характеризуется внедрением в практику мощных энергетических блоков с паровыми котлами большой паропроизводительности. В таких условиях большое значение имеет надежность работы трубных систем. Для инженеров теплоэнергетиков нужно знать законы гидродинамики и теплообмена, методы расчета протекающих процессов парообразования в системе труб, чтобы на этапе проектирования котлов обеспечить его надежную работу. В статье предложен анализ течений в контурах паровых котлов методом характеристик давления.

**Ключевые слова:** массовый поток, паровые котлы, результирующая характеристика, течение, циркуляционный контур.

**Тірек сөздер:** массалық ағын, бу қазандықтары, нәтижелік сипаттама, ағыс, циркуляциялық контур.

**Keywords:** mass flow, steam boilers, resulting characteristics, flow, circulating contour.

Устройство, которое имеет топку для сжигания топлива, и систему поверхностей труб, обогреваемые продуктами сгорания, предназначенное для получения пара с давлением выше атмосферного и используемого вне самого устройства – называются паровым котлом [1]. Процесс образования пара является сложным процессом, реализованным в котле. От процесса парообразования зависит надежность работы котла в целом.

Изучение закономерностей протекания процессов в паровых котлах позволяет поддерживать надежные режимы работы паровых котлов при эксплуатации, которые усложняются с каждым годом привлечением в топливно-энергетический баланс различных топлив с низкосортными углями, часто вызывающих шлакование поверхностей нагрева [2]. При шлаковании поверхностей нагрева возникает неравномерный перенос тепла в трубах, что влечет к дефектам контура труб, и в конце к его разрыву. Таким образом, изучение процесса испарения в контурах паровых котлов при эксплуатационных условиях является актуальной задачей для обеспечения бесперебойной работы установки. Задача изучения гидродинамики паровых котлов состоит в том, чтобы на основе расчетов найти конструктивные решения, которые будут обеспечивать надежность работы всех поверхностей нагрева котла при заданных эксплуатационных тепловых условиях.

В испарителе котла, где фиксированное количество рабочего тела нагревается за счет теплового тока от дымовых газов при сжигании органического топлива, наблюдается повышение температуры. При значении определенного рабочего давления достигается температура кипения (насыщенность) рабочей среды и начинают формироваться пузыри, при постоянной температуре пар будет выходить из поверхности воды. Система получения пара должна обеспечить непрерывный процесс при преобразовании, для этого необходимо регулирование подачи рабочей среды, равное генерируемому пару [3].

Для получения гидродинамических характеристик и массового паросодержания пароводяной смеси в трубах контура котла с естественной циркуляцией требуется сделать анализ циркуляционных контуров парового котла. Для эффективного определения оптимальных (безопасных) значений в работе предложен метод характеристик давления. Метод основывается на графическом представлении разностей давлений и массового расхода в заданных ветвях. Как опускные, так и подъемные ветви могут создаваться соединением индивидуальных параллельно, серийно или комбинированно соединенных труб. В каждом случае нужно найти характеристику результирующей ветви [4].

При параллельном соединении ветвей с опускным течением (рисунок 1, а) или с подъемным течением (рисунок 2, б) результирующая характеристика и рабочая точка будут найдены по условиям:

$$\Delta p_A = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \ldots = \Delta p_n \quad (1)$$

$$\dot{m}_A = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \ldots + \dot{m}_n \quad (2)$$

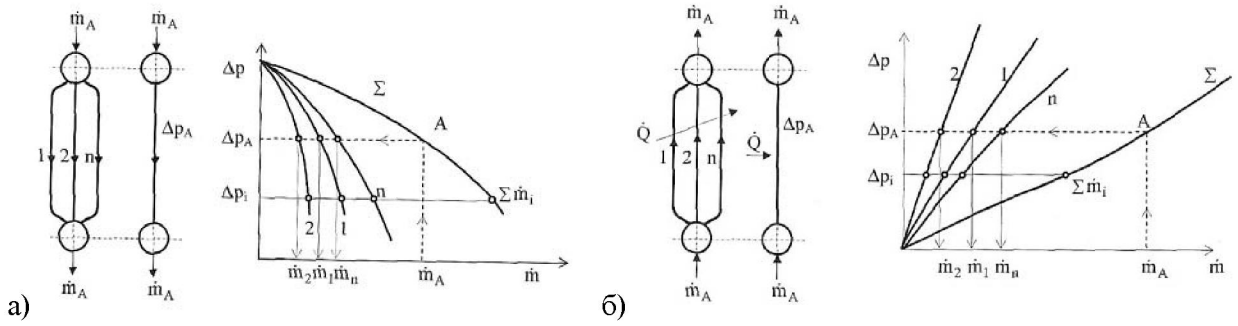


Рисунок 1 – а) Параллельное соединение ветвей с опускным течением рабочей среды;
б) Параллельное соединение ветвей с подъемным течением рабочей среды

При серийном соединении ветвей с опускным течением (рисунок 2, а) или с подъемным (рисунок 2, б) течением результирующая характеристика и рабочая точка будут найдены следующими условиями:

$$\Delta p_A = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \ldots + \Delta p_n \quad (3)$$

$$\dot{m}_A = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \ldots = \dot{m}_n \quad (4)$$

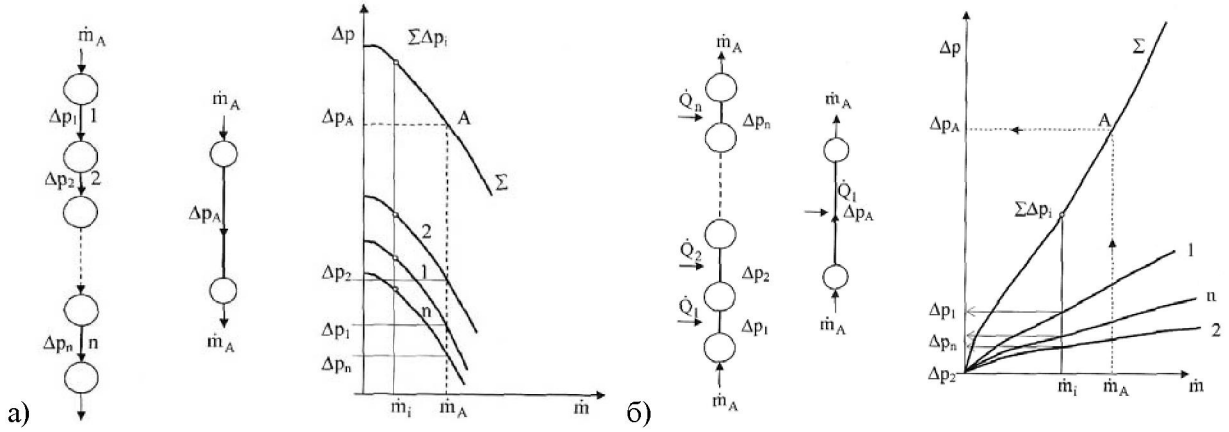


Рисунок 2 – а) Серийное соединение ветвей с опускным течением среды;
б) Серийное соединение ветвей с подъемным течением среды

Также ветви могут быть соединены комбинированно, в этом случае результирующая характеристика и рабочая точка будут получены из условий серийного или параллельного соединения той или иной ветви.

При расчете естественной циркуляции для определения результирующей характеристики учитываются определенные условия указанные выше, и по аналитическим выражениям течения в трубах циркуляционного контура можно найти оптимальные условия для эксплуатации котла на этапе проектирования.

С использованием данного метода в данной статье был анализирован простой контур парового котла с естественной циркуляцией (рисунок 3). Начальные условия при рассмотрении стационарного движения потока в контуре циркуляции не задаются. Граничные условия известны из конструктивного выполнения контура циркуляции, из теплового расчета котла, который проводится до расчета контура циркуляции. В современных паровых котлах опускные трубы делаются без обогрева, с хорошей тепловой изоляцией, поэтому их теплообмен с окружающей средой близок к нулю и не учитывается.

В предложенной работе течение является негомогенной пароводяной смесью в области испарительных труб с постоянным потоком массы по диаметру. Входные параметры для расчета представлены в таблице 1.

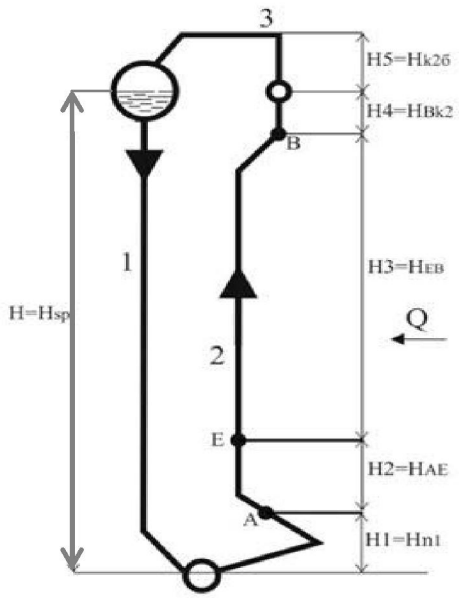


Рисунок 3 – Простой контур парового котла с естественнной циркуляцией

Таблица 1 – Входные параметры для расчета

| Заданные входные параметры | Величина | Размерность | Источник |
|---|---|---|---|
| Паропроизводительность парового котла | 380 | т/ч | [5] |
| Давление в барабане | 14.7 | МПа | |
| Удельная энтальпия воды | 1598.3 | кДж/кг | Данные по IAPWS-IF97 [6] |
| Удельная энтальпия пара | 2619.5 | кДж/кг | |
| Плотность воды | 610.687 | кг/м$^3$ | |
| Плотность пара | 92.764 | кг/м$^3$ | |
| Удельная энтальпия воды из экономайзера $i_e$ | 1494.7 | кДж/кг | [5] |
| Безразмерный параметр воды из барабана $a$ | 0.015 | | |
| Безразмерный параметр воды для регулирования теплоты в пароперегревателе $e$ | 0.039674 | | |

Коэффициенты продувки $a$ и впрыска воды $e$ являются параметрами барабана. Конструкция и геометрические параметры циркуляционного контура взяты из рекомендованных значений индивидуальных частей циркуляционного контура по [7].

Контур состоит из необогреваемой опускной трубы и обогреваемой в участке $AB$ подъемной трубы. Расчет перепада давлений течения проводился отдельно для каждого участка контура труб.

Результаты вычислений позволяют продемонстрировать значения гидродинамических характеристик течений в трубах парового котла и величину паросодержания ($x_2$).

На рисунке 4 показана зависимость давления от массового расхода пароводяной смеси. Аппроксимированием была найдена сухость пара в точке $A$ (пересечение опускной и подъемной ветви), соответствующее $x_2$ = 0.1897. Перепад давления в опускной трубе $\Delta p = 1.9048 \cdot 10^5$ Па, а в подъемной части труб $\Delta p = 1.9048 \cdot 10^5$ Па, что соответствует условию параллельно соединенной ветви (1), массовый расход смеси $\dot{m} =$ 12.3121 кг/с, кратность циркуляции $C$ = 5.2708. Предельное значение объемного паросодержания по [8] $\beta_{lim}$ = 0.6034; а массовое паросодержание $x_{min}$ = 0.1911. Из этого следует, что найденная величина паросодержания простого контура соответствует ранее обозначенным условиям [8] и обеспечивает надежную работу всего контура котла.

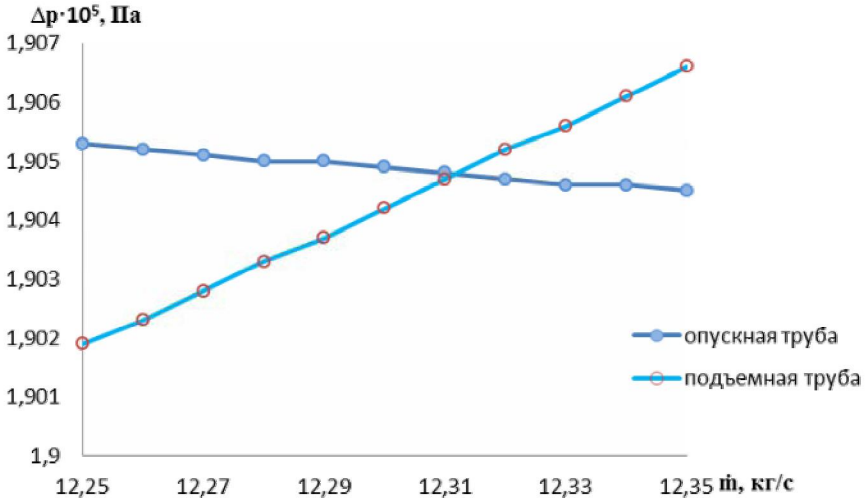


Рисунок 4 – Зависимость перепада давления от массового расхода пароводяной смеси

## ЛИТЕРАТУРА

1 Стырикович М.А., Катковская К.Я., Серов Е.П. Котельные агрегаты. Москва: Госэнергоиздат, 1959. 488 стр.

2 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmukhamet A., Beketayeva M.T. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // International Journal of Mechanics", ISSN: 1998-4448, Issue 3, Vol. 7, 2013, Pages: 343-352

3 Лебедев И.К. Гидродинамика паровых котлов. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 240 стр.

4 Jirouš F. Aplikovaný přenos tepla a hmoty. Česká technika - nakladatelství ČVUT. Praha. 2010. 205 S.

5 VDI Warmeatlas 9. Auflage. Berlin: Springer, 2002.

6 Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. IAPWS. 2007

7 О.М. Балдин, В.А. Локшин, Д.Ф. Петерсон и др. Гидравлический расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Москва: Энергия, 1978.

8 Steam – its Generation and Use. The Babcock & Wilcox Company. New York. 1992.

## REFERENCES

1 Styrikovych M.A., Katkovskaya K.Ya. Serov E.P. Kotelnye agregaty Moskva: Gosenergoizdat, **1959**. 488 str. (in Russ)

2 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmukhamet A., Beketayeva M.T. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP. *International Journal of Mechanics*, ISSN: 1998-4448, Issue 3, Volume 7, **2013**, Pages: 343-352.

3 Lebedev I.K. Gidrodinamika parovych kotlov. Moskva: Energoatomizdat, **1987**. 240 str. (in Russ)

4 Jirouš F. Aplikovaný přenos tepla a hmoty. *Česká technika - nakladatelství ČVUT*. Praha. **2010**. 205 S.

5 VDI Warmeatlas 9. Auflage. Berlin: Springer, **2002**.

6 Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. IAPWS. **2007**

7 Baldin O.M., Lokshin V.A., Peterson D.F. Gidravlicheskyi raschet kotelnych agregatov. Normativnyi metod. Moskva: Energiya, **1978**.

8 Steam – its Generation and Use. The Babcock & Wilcox Company. New York. **1992**.

## Резюме

*Ә. С. Асқарова, С. Ә. Бөлегенова, М. Т. Бекетаева, Г. Қ. Мұқашева*

(Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан)

ҚЫСЫМ СИПАТТАМАСЫНЫҢ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ
БУ ҚАЗАНДЫҚТАРЫ КОНТУРЫНДАҒЫ АҒЫСТАРДЫ ТАЛДАУ

Заманауи жылуэнергетиканың дамуы қолданысқа жоғарғы деңгейде бу өндіретін бу қазандықтарының қуатты энергетикалық блоктарын енгізумен сипатталады. Мұндай шарттарда құбыр жүйелерінің сенімделген жұмысы үлкен мәнге ие болып отыр. Қазандықтардың сенімді жұмысын қамтамасыз ету үшін, жылуэнергетика инженерлері гидродинамика және жылуалмасу заңдарын, құбырлар жүйесіндегі бу түзілу процестерінің есептелу әдістерін біліп игеруі тиіс.

Берілген мақалада қысымдар сипаттамасы әдісі бойынша бу қазандықтарының контурларындағы ағыстардың талдауы көрсетілген.

**Тірек сөздер:** массалық ағын, бу қазандықтары, нәтижелік сипаттама, ағыс, циркуляциялық контур.

**Summary**

*A. S. Askarova, S. A. Bolegenova, M. T. Beketayeva, G. K. Mukasheva*

(Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan)

ANALYS OF FLOWS IN CIRCULATION CIRCUIT OF STEAM BOILERS
BY PRESSURE CHARACTERISTICS METHOD

The development of modern power system characterized by conduction into practice the powerful energy blocks with large steam capacity. In such circumstances, has of great importance reliability of pipe systems. So for engineers in thermal engineering needed to know laws of hydrodynamics and heat transfer, methods of calculating the evaporation processes occurring in the piping system at the designing stage of boilers provided their reliable operation. The article offers an analysis of flows in circuit pipes of steam boilers by pressure characteristics.

**Keywords:** mass flow, steam boilers, resulting characteristics, flow, circulating contour.