

**С.В. АВРАМЕНКО**, ДВНЗ «ДОННТУ», Донецк;  
**В.П. ТАРАСЮК**, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «ДОННТУ», Донецк

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В БАРАБАНЕ КОТЛА**

В работе аргументирована актуальность мониторинга уровня жидкости в барабане котла и рассмотрены существующие средства измерения уровня. Уровень в барабане оценивается как многозвенный параметр. Определены факторы, влияющие на точность измерения уровня: динамика давления, температуры и разности плотностей воды и газа. Составлено уравнение баланса для уровня жидкости в барабане котла с учетом дестабилизирующих факторов. Предложен алгоритм определения уровня жидкости в барабане с учетом дестабилизирующих факторов, который позволяет синтезировать структурную схему системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла.

У роботі аргументована актуальність моніторингу рівня рідини в барабані котла та розглянуто існуючі засоби вимірювання рівня. Рівень у барабані оцінюється як багатоланковий параметр. Визначено фактори, що впливають на точність вимірювання рівня: динаміка тиску, температури і різниці густин води і газу. Складено рівняння балансу для рівня рідини в барабані котла з урахуванням дестабілізуючих факторів. Запропоновано алгоритм визначення рівня рідини в барабані з урахуванням дестабілізуючих факторів, який дозволяє синтезувати структурну схему системи моніторингу рівня рідини в барабані котла.

The paper argued the importance of monitoring the fluid level in the boiler drum and reviewed the existing means of measuring the level. The level in the drum is evaluated as multi-tier option. Factors affecting the accuracy of the measurement of: Dynamics of pressure, temperature and density differences of water and gas. Compiled by the balance equation for the liquid level in the drum of the boiler, taking into account the destabilizing factors. An algorithm for determining the level of liquid in the drum, taking into account the destabilizing factors, which allows to synthesize a block diagram of a system for monitoring the liquid level in the drum of the boiler.

**Общая постановка проблемы.** Эффективная эксплуатация барабанных парогенераторов в условиях теплоэлектроцентралей и теплоэлектростанций может осуществляться при условии строго поддержания уровня воды в барабане в некоторых допускаемых пределах. Для уменьшения затрат на внеочередные пуски и ремонтные работы котлоагрегата при аварийных остановках необходим оперативный контроль уровня воды в барабане современных мощных парогенераторов, имеющих весьма ограниченный запас воды. Это является важной и актуальной задачей при их эксплуатации [1].

**Цели и задачи.** Одним из основных требований, предъявляемых к энергооборудованию, является высокая надежность и большой ресурс, что определяет экономические показатели энергоустановок. Разработка оборудования минимально возможных габаритов и массы приводит к его высокой теплонапряженности. К наиболее дорогим, сложным и функционально необходимым элементам оборудования относятся парогенераторы, основой которых является толстостенный барабан котла.

Существующие системы контроля уровня воды в барабане парогенераторов с малой паропроизводительностью и низким давлением пара в барабане основаны на непосредственном наблюдении за уровнем по водомерному устройству. В этом случае применяют показывающие дифманометры-уровнемеры [1]. Их недостатком является то, что сразу после продувки, уровень в водомерной колонке значительно выше исходного. По мере охлаждения воды, уровень приближается к начальному. Температура в барабане может изменяться от (450-550) °С на выходе до (200-300)°С на входе. Уменьшение температуры питательной воды на 100 °С при неизменной нагрузке котла и коэффициенте избытка воздуха приводит к росту температуры перегретого пара на (25-30) °С, следовательно он может находиться за пределами видимости водомерной колонки. Т.е. уровень в барабане может быть на (10-30) мм выше уровня в колонке, что может привести к аварийной ситуации. Разность этих уровней зависит от исходного уровня, изменения температуры и давления в барабане. Графики (см. рис. 1) показывают, что с увеличением исходного уровня и с изменением температуры или давления в барабане разность уровней в барабане и водомерной колонке возрастает при одинаковых исходных уровнях. Очевидно, что подходить к оценке уровня в барабане необходимо не как одно-, а многозвенному параметру. Соответственно контроль уровня должен осуществляться при помощи многопараметрического комплекса средств измерения.

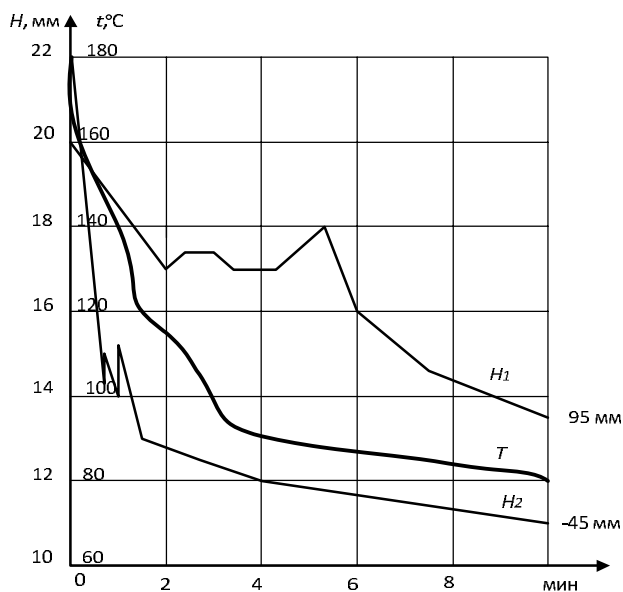


Рис. 1. Изменение уровня  $H$  и температуры  $T$  в водомерной колонке во времени после ее продувки при стабильном давлении и начальных значениях уровня:

$$H_1=95\text{мм}, H_2=45\text{мм}$$

Целью работы является обеспечение контроля уровня жидкости в барабане котла тепловой электростанции, путем многопараметрического измерения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- определить факторы, влияющие на точность измерения уровня;
- провести анализ существующих методов и средств измерения уровня в барабане котла;
- проанализировать существующие математические модели процесса измерения уровня в барабане котла с учетом всех дестабилизирующих факторов;
- разработать структурную схему системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла и алгоритм ее функционирования.

**Основная часть.** Регулирование питания котельных агрегатов и регулирование давления в барабане котла главным образом сводится к поддержанию баланса между отводом пара и подачей воды. Параметром, характеризующим баланс, является уровень воды в барабане котла (см. рис.2). Надежность работы котельного агрегата во многом определяется качеством регулирования уровня. При повышении давления, снижение уровня ниже допустимых пределов, может привести к нарушению циркуляции в экранных трубах, в результате чего произойдет повышение температуры стенок обогреваемых труб и их пережог. Повышение уровня также ведет к аварийным последствиям, так как возможен заброс воды в пароперегреватель, что вызывает выход его из строя.

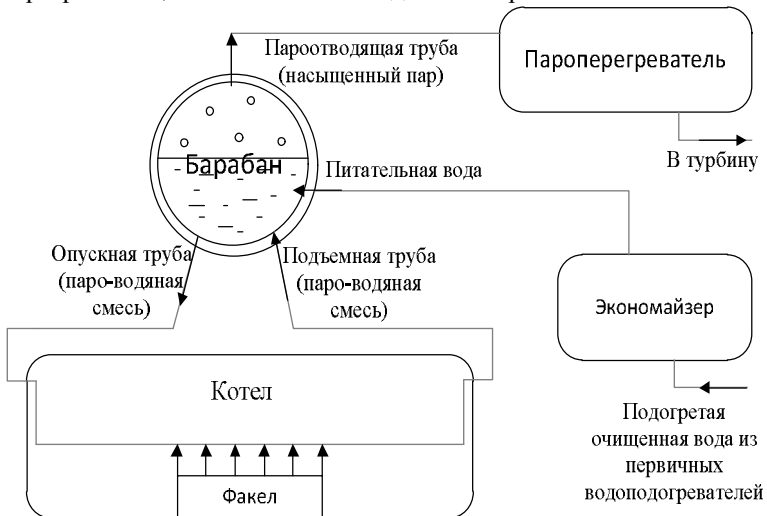


Рис. 2. Циркуляция воды в барабанном котле с естественной циркуляцией

В связи с этим, к точности поддержания заданного уровня предъявляются очень высокие требования. Низший уровень воды должен быть не менее чем на 25 мм выше нижней видимой кромки стекла водоуказателя, а высший уровень — не менее, чем на 25 мм ниже верхней видимой кромки водоуказателя (сверх этого уровня нельзя накачивать воду в котел во избежание выброса воды в паропровод). Расстояние между высшим и низшим уровнями выбирают от 50 до 100 мм (в зависимости от размеров котла).

Качество регулирования питания также определяется равенством подачи питательной воды. Необходимо обеспечить равномерное питание котла водой, так как частые и глубокие изменения расхода питательной воды могут вызвать значительные температурные напряжения в металле экономайзера.

Контроль соотношения газ-воздух необходим с точки зрения физико-экономических характеристик. Сигнализация о срабатывании защиты, действующей на останов котла, необходима для соблюдения техники безопасности и предотвращения аварийных ситуаций. При выпуске воды из барабана, уровень воды в нем понижается, вследствие этого может быть нарушена циркуляция и вызван пережег труб донных экранов. Если защита сработает без промедления, то возможно предотвратить выход из строя парогенератора. При уменьшении нагрузки парогенератора, интенсивность горения в топке снижается. Горение становится неустойчивым и может прекратиться. В связи с этим должна быть предусмотрена защита по погашению факела [2,3].

При измерении уровня воды  $H$  в барабанах паровых котлов в настоящее время применяются уровнемеры, работающие по принципу измерения разности давлений, создаваемых постоянным столбом жидкости в уравнительном сосуде и столбом жидкости в барабане котла. Двухкамерный, однокамерный или комбинированный уравнительный сосуд присоединяется к специальным штуцерам барабана котла или к штуцерам водомерного стекла. Камера переменного уровня прибора соединяется с паровым пространством барабана и плюсовой полостью уровнемера.

Для контроля уровня в барабане котла необходимо учесть все процессы, оказывающие дестабилизирующее влияние на баланс системы «котел-барабан» (см. рис.3). Поведение данной системы обусловлено общим массовым и энергетическим балансом. Параметры на входе в систему:  $Q$  – расход теплового потока на входе в систему,  $q_f$  – массовый расход питательной воды,  $q_s$  – массовый расход пара. Параметры на выходе системы:  $P$  – давление в барабане,  $l$  – уровень воды в барабане,  $\rho'$  и  $\rho''$  – плотность воды и пара в состоянии насыщения при давлении  $P$ , кг/м<sup>3</sup>.

Массовый баланс системы можно представить как:

$$\frac{d}{dt} [\zeta_s V_{st} + \zeta_w V_{wt}] = q_f - q_s, \quad (1)$$

где  $\zeta_s, \zeta_w$  - удельная плотность пара и воды соответственно,  $V_{st}, V_{wt}$  - объем пара и воды всей системы соответственно.

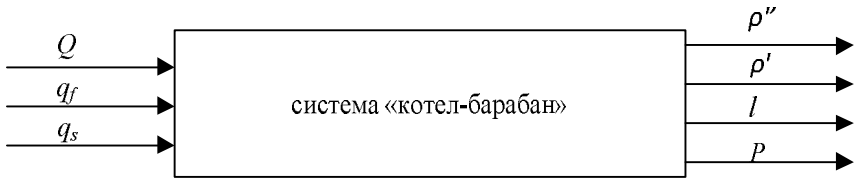


Рис. 3. Система «Котел-барабан»

Общий энергетический баланс системы:

$$\frac{d}{dt} [\zeta_s u_s V_{st} + \zeta_w u_w V_{wt} + m_t c_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s, \quad (2)$$

где  $m_t$  - общая масса металлических труб,  $c_p$  - удельная теплоемкость металла,  $t_m$  - температура металла,  $u_s, u_w$  - удельная внутренняя энергия пара и воды соответственно,  $h_f, h_s$  - удельная энтальпия питательной воды и насыщенного пара. Если учесть, что энергия:

$$u = h - \frac{p}{\zeta}.$$

Таким образом, общий энергетический баланс может быть записан в виде:

$$\frac{d}{dt} [\zeta_s h_s V_{st} + \zeta_w h_w V_{wt} - p V_t + m_t c_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s, \quad (3)$$

$h_w$  - удельная энтальпия воды,  $V_t$  - полный объем барабана:

$$V_t = V_{st} + V_{wt}.$$

Температура металла может быть выражена, как функция давления, предполагая, что изменения температуры металла строго связаны с изменениями в температуре насыщения пара  $t_s$  и таким образом с изменением давления  $P$ . Температура металла в стационарном состоянии близка к температуре насыщения и имеет незначительную динамику.

Правая часть формулы (3) представляет энергетический поток, возникающий в системе в результате сжигания топлива и циркуляции потоков питательной воды и пара.

Рассмотрим распределение пара в барабане. При открытии парового клапана, уровень воды в барабане возрастает, т.к. давление будет падать. Предположим, что все величины распределены по времени  $t$  в пространстве

$z$ , и в любом поперечном сечении барабана величины принимают одинаковые значения. Таким образом, пространственное распределение может быть описано одной координатой  $z$ , а все переменные являются функциями от  $t$  и  $z$ . Тогда массовый и энергетический балансы для нагретого участка барабана с площадью поперечного сечения  $A$  будут соответственно равны:

$$A \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial \zeta \cdot h}{\partial t} + \frac{\partial q \cdot h}{A \cdot \partial z} = \frac{Q}{V}.$$

С учетом удельных энтальпий насыщенного пара и воды определим внутреннюю энергию пароводяной смеси:

$$h = \alpha_m \cdot h_s + (1 - \alpha_m) h_w = h_w + \alpha_m \cdot h_c, \quad (4)$$

где  $h_c = h_s - h_w$  - энтальпия конденсации,  $\alpha_m$  - массовая доля пара в потоке, указывающая на качественный состав смеси, которую можно определить из условия, что система находится в статическом состоянии:

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial q \cdot h}{\partial z} = q \cdot h_c \cdot \frac{\partial q \cdot \alpha_m}{\partial z} = \frac{Q \cdot A}{V}.$$

Следовательно, из (4):

$$\alpha_m = \frac{Q \cdot A}{V \cdot q \cdot h_c} \cdot z.$$

$\alpha_m$  можно представить как зависимость от количественного состава пара на выходе из барабана  $\alpha_r$ , при условии, что известна нормированная длина самого барабана  $\xi$ :

$$\alpha_m(\xi) = \alpha_r \cdot \xi \quad 0 \leq \xi \leq 1. \quad (5)$$

Однако, чтобы учесть все процессы, протекающие в барабане, необходима более сложная – объемная модель. Объемная и массовая доля пара связаны посредством:  $\alpha_v = f(\alpha_m)$ , где:

$$f(\alpha_m) = \frac{\zeta_w \cdot \alpha_m}{\zeta_s + (\zeta_w - \zeta_s) \cdot \alpha_m}. \quad (6)$$

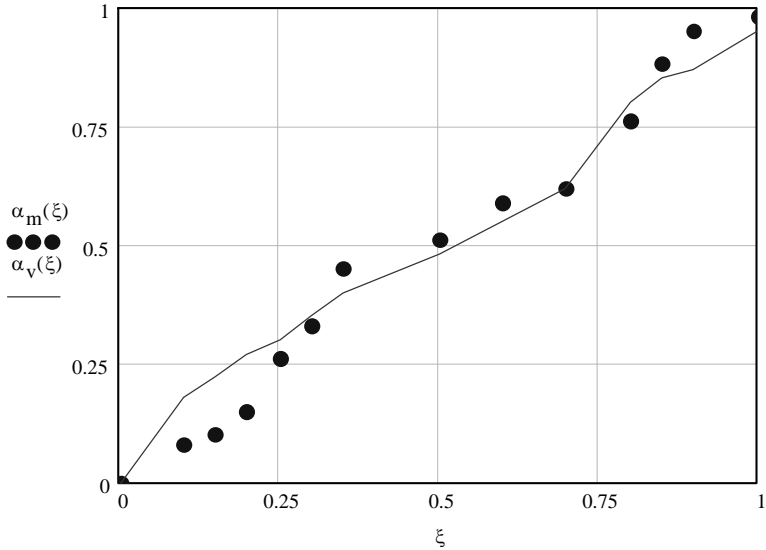


Рис. 4. Сравнение объемного и массового распределения пара (качественный состав пароводяной смеси) по всей длине барабана

Исходя из (4) и (5) можно построить модель распределения пара в стационарном режиме. Для получения модели уровня пара важно описать общее количество пара в барабане, которое определяется средней объемной долей пара в барабане. Предположим, что массовая доля линейна вдоль барабана как показано в (5), то находим среднее распределение объема пара:

$$\bar{\alpha}_v = \int_0^1 \alpha_v(\xi) d\xi = \frac{1}{\alpha_r} \cdot \int_0^{\alpha_r} f(\xi) d(\xi) = \frac{\zeta_w}{\zeta_w - \zeta_s} \cdot \left[ 1 - \frac{\zeta_w - \zeta_s}{(\zeta_w - \zeta_s) \cdot \alpha_r} \cdot \ln\left(1 + \frac{\zeta_w - \zeta_s}{\zeta_s} \cdot \alpha_r\right) \right]. \quad (7)$$

Будем считать, что массовое распределение пара является линейным, т.е. уравнение (5) имеет смысл в условиях динамики системы. Ключевым моментом при описании данной системы является перенос массы и энергии между водой и паром путем конденсации и испарения. При моделировании каждой фазы отдельно не учитывается этот перенос. Этого можно избежать, если подойти к описанию процессов, происходящих в барабане через механизмы распределения воды и пара и конденсации.

Очевидно, что нельзя обойтись без учета процессов, происходящих в самой системе. Учитывая распределения пара, мы можем представить уровень жидкости в барабане через объем воды в барабане  $V_w$ :

$$V_w = V_l - V_p + (1 - \bar{\alpha}_v) V_{in} \quad (8)$$

Где  $V_p$  - объем пароводяной смеси, возникающей в результате наличия разности плотностей воды и пара  $\Delta(\rho' - \rho'')$ ,  $V_{in}$  - объем входящей в барабан питательной воды.

Таким образом, с учетом вышеописанной математической модели распределения паро-водяной смеси в барабане, можно выделить ряд факторов, определяющих уровень воды в барабане парогенератора. Необходимо учитывать изменение давления  $\Delta P$ , температуры  $\Delta T$  и разности плотностей воды и пара  $\Delta(\rho' - \rho'')$ . Нами предложено представить контроль уровня жидкости в барабане  $H_\delta$  в виде терминального функционала:

$$H_\delta = f(h_1, h_2(\Delta P), h_3(\Delta T), h_4(\Delta(\rho' - \rho''))) \quad (9)$$

где  $h_2, h_3, h_4$  - весовые коэффициенты, отражающие погрешность вносимую динамикой давления, температуры и плотностей жидкости и газа соответственно. Предложенный функционал можно записать в виде многочлена:

$$H_\delta = h_1 + h_2(\Delta P) + h_3(\Delta T) + h_4(\Delta(\rho' - \rho'')), \quad (10)$$

решение которого позволит обеспечить контроль уровня жидкости в барабане котла тепловой электростанции путем многопараметрического измерения дестабилизирующих факторов.

Для сосуда, размеры которого известны, учтем погрешность, возникающую в результате перепада давления, которую определим из равенства:

$$h_2(\Delta P) = l\gamma' + L\gamma_T - H_\delta(\gamma' - \gamma'') - r\gamma'' + \Delta p_{l, \kappa z} / m^2, \quad (11)$$

где  $\Delta P$  - расчетный перепад давлений для текущего значения уровня в барабане,  $\kappa z / m^2$ ;  $l$  - длина горячей части трубки,  $m$ ;  $L$  - длина холодной части трубки,  $m$ ;  $\gamma_T$  - удельный вес воды в холодной части трубки при температуре окружающего воздуха  $T^\circ C$ ,  $\kappa z / m^2$ ;  $H_\delta$  - текущее значение уровня в барабане, отсчитываемое от оси нижней врезки сосуда,  $m$ ;  $\gamma', \gamma''$  - удельный вес воды и пара соответственно при температуре насыщения,  $\kappa z / m^3$ ;  $r$  -



расстояние между нижней врезкой в сосуд и трубкой слива,  $m$ ;  $\Delta p_l$  - перепад давлений между плюсовой и минусовой камерами датчика, залитого холодным конденсатом,  $кг/м^2$ .

Об уровне  $H_\delta$  в барабане можно судить по изменению температуры столба воды. Это позволит учесть, что вследствие охлаждения уровень воды в колонке оказывается ниже действительного уровня в барабане и разность между ними возрастает с увеличением давления и повышением уровня в барабане.

Т.о., погрешность, возникающая в результате перепада давлений с учетом охлаждения горячей части трубки может быть определена по формуле:

$$h_2(\Delta P) = l\gamma^* + L\gamma_T - H_\delta(\gamma' - \gamma'') - r\gamma'' + \Delta p_l, кг/м^2, \quad (12)$$

где  $\gamma^*$  - средний удельный вес воды в горячей части плюсовой трубки, определенный при средней температуре воды  $T_{cp}$ ,  $кг/м^3$ .

Средняя температура воды в горячей части определится из уравнения:

$$T_{cp} = \frac{T' - \Delta T_a}{2},$$

$$\Delta T_a = (T' - T_c) \left(1 - \frac{1}{e^m}\right), \quad (13)$$

где  $T'$  - температура насыщения при данном давлении,  $^{\circ}C$ ;  $\Delta T_a$  - разность между температурой насыщения и температурой нижней точки водомерной колонки,  $^{\circ}C$ ;  $T_c$  - температура окружающей среды,  $^{\circ}C$ ,

$$m = \frac{r}{(T' - T_c)c_p} \cdot \frac{H_\delta}{r - H_\delta},$$

где  $r$  - скрытая теплота парообразования,  $ккал/кг$ ;  $c_p$  - средняя теплоемкость воды в интервале температур от  $T'$  до температуры нижней точки водомерной колонки,  $ккал/кг \cdot ^{\circ}C$ . Весовой коэффициент, отражающий погрешность по температуре определим как:

$$h_3(\Delta T) = \frac{\Delta T_a}{T_{cp}}; \quad (14)$$

С увеличением уровня и давления в барабане разность между уровнем в барабане и водомерной колонке возрастает. При этом коррекция только по давлению или только по температуре не обеспечивает достаточной точности измерения уровня воды в барабане мощных парогенераторов при меняющихся давлениях пара в широких пределах, т.к. изменение разности

плотностей воды и пара  $\Delta(\rho' - \rho'')$  не является линейной функцией давления (или температуры) пара в барабане.

Для определения плотности контролируемой среды в рабочих условиях предлагаем применение плотномеров, не изменяющих структуру потока. Точку отбора пробы газа расположим в верхней, а жидкостей - в нижней части горизонтального участка трубопровода. Корректировку уровня по показаниям плотномера предлагаем выполнить по формуле:

$$h_d(\Delta(\rho' - \rho'')) = \frac{\rho \cdot p}{p_p} = \frac{\rho \cdot p}{p - \Delta p_p} = \frac{\rho}{1 - \frac{\Delta p_p}{p}} = \rho \cdot c_p, \quad (15)$$

где  $\frac{1}{1 - \frac{\Delta p_p}{p}} = c_p$  - поправочный коэффициент;  $\rho_o$  - показания

плотномера;  $p_p$  - давление в чувствительном элементе плотномера;  $\Delta p_p$  - разность между давлениями на входе в колонку и в чувствительном элементе плотномера.

Предлагается структурная схема системы мониторинга уровня воды в барабане котла, которая приведена на рисунке 5:

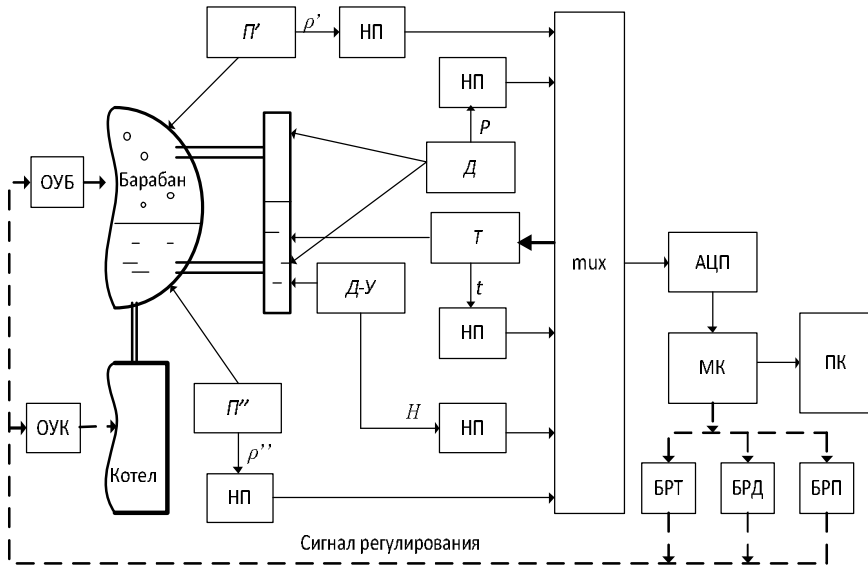


Рис. 5. Укрупненная структурная схема системы мониторинга уровня воды в барабане котла

Измерение уровня предлагается осуществлять дифманометром-уровнемером Д-У. Измерение плотности воды и пара плотномерами П' и П''

соответственно, давление - датчиком давления  $D$  и температуру – датчиком температуры  $T$ . Это даст возможность корректировки измеренных значений уровня с учетом всех влияющих параметров. В процессе обработки скорректированных величин в микропроцессорном блоке происходит их сравнение с граничными, и, в случае необходимости, в блоках регулирования температуры, давления и плотности (БРТ, БРД, БРП соответственно) вырабатывается сигнал регулирования. Таким образом, с помощью органов управления барабаном (ОУБ) и котлом (ОУК) можно обеспечить постоянный контроль уровня в барабане, а следовательно - уменьшить количество аварийных остановов, снизить затраты на незапланированные запуски и восстановительные работы.

### **ВЫВОДЫ.**

1. Проведен анализ использующихся в настоящее время средств измерения уровня воды в барабане котла, выявлены их недостатки.

2. Рассмотрена математическая модель, описывающая распределение пара и воды и определяющая уровень воды в барабане исходя из представлении об объемном соотношении пара и воды. Предложено ввести в нее коррекцию по температуре, давлению и разности плотностей воды и газа, что повысит точность измерений.

3. Предложена структурная схема компьютерной системы мониторинга уровня воды в барабане котла, применение которой позволит уменьшить количество аварийных остановов, а также снизить затраты на незапланированные запуски и восстановительные работы.

**Список литературы:** 1. Цане С.В. Газотурбинные и парогенераторные установки тепловых электростанций.- М.: МЭИ, 2002.- 426 с. 2. Сидельковский Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1991. 390 с. 3. Резников М.И. Паровые котлы тепловых электростанций / М.И. Резников, Ю.М. Липов. М.: Энергоиздат, 1999. 240 с.

*Надійшла до редакції 15.04.12*