

УДК 621.181.123

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ВАКУУМНОГО КОТЛА

*Е.Н. Слободина, А.Г. Михайлов*

Показаны перспективы использования вакуумных котлов как основного автономного источника для получения тепловой энергии для систем теплоснабжения. Рассмотрены особенности работы и конструкции вакуумного котла. Представлены основные положения математической модели для теплового расчета вакуумного котла с использованием k-ε модели ANSYS CFX для описания турбулентных течений смеси реагирующих газов с учетом переноса теплоты излучением и конвекцией, и модели RPI ANSYS CFX, описывающей процессы кипения жидкости. Показаны результаты расчетных исследований влияния давления в разреженном объеме на теплофизические характеристики и рабочие параметры котла, такие как температура насыщения, коэффициент теплоотдачи при кипении жидкости, температура стенки со стороны воды и тепловых потерь с уходящими газами.

*Ключевые слова:* вакуумный котел; кипение; коэффициент полезного действия; коэффициент теплоотдачи.

---

## ВАКУУМ КАЗАНЫНЫН ИШИНИН НАТЫЙЖАЛУУЛУГУ ЖАНА АНЫН ЖЫЛУУЛУГУН ЭСЕПТӨӨНҮН ЖЫЙЫНТЫКТАРЫ

*Е.Н. Слободина, А.Г. Михайлов*

Бул макалада жылуулук менен камсыздоо системалары үчүн жылуулук энепргиясын алууда негизги автономдук булак катары вакуум казандарын пайдалануунун келечеги көрсөтүлдү. Вакуум казанынын иштөө өзгөчөлүгү жана конструкциясы каралды. Жылуулуктун нурдануу жана конвекция менен таралышын эске алуу менен таасир берүүчү газдардын аралашмасынын турбуленттик агымын сүрөттөө үчүн ANSYS CFX k-ε моделин жана суюктуктун кайноо процессин сүрөттөөчү RPI ANSYS CFX моделин пайдалануу менен вакуум казанынын жылуулугун эсептөө үчүн математикалык моделдин негизги жоболору берилди. Кесилген көлөмдө басымдын казандын физикалык мүнөздөмөсүнө жана иштөө параметрлерине, мисалы температурасына, суюктук кайнагандагы жылуулук берүү коэффициенти, суу тараптан капталдын температурасына жана чыккан газ менен жылуулукту жоготууга тийгизген таасирин эсептик изилдөөнүн жыйынтыктары берилди.

*Түйүндүү сөздөр:* вакуум казаны; кайноо; пайдалуу иш-аракет коэффициенти; жылуулук берүү коэффициенти.

---

## EFFICIENCY AND RESULTS OF HEAT CALCULATION OF VACUUM BOILER

*E. N. Slobodina, A. G. Mikhailov*

The article shows the prospects of using vacuum boilers as the main autonomous source for generating thermal energy for heat supply systems. The features of the operation and design of the vacuum boiler are considered. The basic provisions of the mathematical model for the thermal calculation of a vacuum boiler using the k-ε ANSYS CFX model for describing turbulent a mixture flows of reacting gases taking into account heat transfer by radiation and convection, and the RPI ANSYS CFX model describing the boiling processes of a liquid are presented. The computational studies results of the pressure effect in a rarefied volume on the thermophysical characteristics and operating parameters of the boiler, such as saturation temperatures, liquid boiling heat transfer coefficient, wall temperature in the water side and heat loss with flue gases, are shown.

*Keywords:* vacuum boiler; boiling; efficiency; heat transfer.

Высокоэффективный котел – это котел для выработки нагретого теплоносителя высокого качества, работающий без отложений со сто-

роны жидкого теплоносителя, с наименьшими рисками возникновения коррозии на поверхностях нагрева. Поэтому необходимы мероприятия

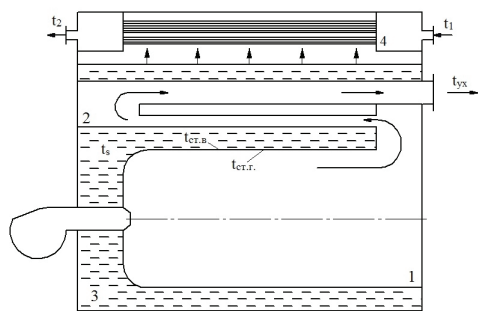


Рисунок 1 – Расчетная схема вакуумного котла:

1 – жаровая труба; 2 – конвективный пучок;

3 – объем с разрежением,

4 – сетевой теплообменник,

$t_{ст.г}$  – температура стенки со стороны газов,

$t_{ст.в}$  – температура стенки со стороны воды,

$t_{ух}$  – температура уходящих газов,  $t_1$  – температура теплоносителя на входе,  $t_2$  – температура теплоносителя на выходе,  $t_s$  – температура насыщения

по получению химически очищенной котловой воды надлежащего качества, разработке новых конструктивных решений для модификации поверхностей нагрева, способных обеспечить надежную работу котла [1, 2].

К современным конструкциям водогрейных котлов можно отнести вакуумные котлы. Они обладают длительным сроком службы, отсутствуют риски отложений, коррозии на поверхностях нагрева.

Вакуумный котел в качестве источника теплоты может использоваться в системах отопления и горячего водоснабжения, в качестве нагревателя жидкостей и газов для технологических нужд в различных отраслях промышленности, в том числе в нефтегазовой.

В настоящее время существуют различные конструкции подобных котлов, они представлены такими производителями, как например “Дорогобужкотломаш”, серия “Vacumatic”, японская фирма “Takuma”.

Вакуумный котел (рисунок 1) представляет собой герметичный резервуар (3), который заполняется фиксированным объемом котловой воды высокого качества (дистиллят). Котловая вода в процессе эксплуатации не выводится из агрегата. Топка котла 1 представляет собой жаровую трубу, находящуюся ниже уровня воды, на наружной поверхности жаровой трубы

происходит кипение жидкости. Котел работает с естественной циркуляцией с использованием различного вида топлива (предпочтительно газообразное). В объеме резервуара 3 создается разрежение, которое автоматически поддерживается вакуумным насосом, вода закипает при температуре ниже 100 °С и образуется пар, который конденсируется на сетевом теплообменнике 4, и затем поступает обратно в водный объем. Выше уровня воды в паровом пространстве установлен сетевой теплообменник 4. Теплообменники выполняются из нержавеющей стали, отсутствие кислорода предотвращает быстрый износ поверхностей нагрева [1, 2].

В котле происходит пристеночное кипение на теплообменных поверхностях, которое сопровождается естественной конвекцией. С ростом подведенного количества теплоты кипение происходит во всем объеме теплоносителя. Рабочее давление ниже атмосферного и постоянно.

Вакуумные котлы нашли широкое применение в различных отраслях промышленного производства – в теплотехнике, биотехнологии, нефтехимии и многих других.

Для теплового расчета котел условно разделяется на три зоны: жаровая труба; конвективный пучок и объем с разрежением, что позволяет учитывать особенности теплообмена в каждой зоне.

В расчете используется вакуумный котел мощностью 400 кВт.

Жаровая труба выполнена в форме цилиндра, расположение горизонтальное. Основные геометрические характеристики: длина 1,13 м, диаметр 0,63 м. Общая площадь конвективного пучка 9,36 м<sup>2</sup>.

В качестве основного топлива используется природный газ с расходом 0,0120 м<sup>3</sup>/с. Диапазон рабочего давления изменялся от 60,80 до 607,95 кПа.

Для расчета теплообмена в котле используется *k-ε модель ANSYS CFX* с двумя уравнениями для турбулентных течений смеси газов в жаровой трубе (1) и конвективном пучке (2), где *k* – турбулентная кинетическая энергия; *ε* – величина рассеивания кинетической энергии [3–6].

Для описания процессов теплопереноса при кипении и давлении ниже атмосферного в объеме (3) используется модель RPI ANSYS CFX, которая включает в себя:

1. Уравнения неразрывности для жидкой и газовой фаз:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \vec{U}_k) = \frac{\Gamma_{ki} - \Gamma_{ik}}{\rho_k},$$

где  $k$  – соответствует агрегатному состоянию вещества;  $l$  – жидкость;  $g$  – газ;  $i$  – направление фазового перехода;  $\alpha$ ,  $\rho$  и  $U$  – массовая доля, плотность и скорость вещества;  $\Gamma_{gl}$  – скорость испарения единицы объема, в связи с процессом парообразования на стенке;  $\Gamma_{lg}$  – скорость конденсации единицы объема.

2. Уравнение для концентраций на границе раздела фаз:

$$\alpha_l = 1 - \alpha_g.$$

3. Уравнения сохранения импульса для жидкой и газовой фаз:

$$\frac{\partial \alpha_k \vec{U}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \vec{U}_k \vec{U}_k) = -\nabla \cdot (\alpha_k (\vec{R}_k + \vec{R}_k^i)) - \frac{\alpha_k \nabla p + \alpha_k \vec{g} + \frac{\vec{M}_k}{\rho_k} + \frac{\Gamma_{ki} \vec{U}_i - \Gamma_{ik} \vec{U}_k}{\rho_k}},$$

где  $\vec{R}_k + \vec{R}_k^i$  – тензоры напряжений, зависящие от свойств и скорости жидкости;  $-\nabla \cdot (\alpha_k (\vec{R}_k + \vec{R}_k^i))$  – сумма сил, действующих на границе раздела фаз.

4. Уравнение сохранения энергии для жидкой фазы:

$$\frac{\partial((1-\alpha)h_l)}{\partial t} + \nabla \cdot ((1-\alpha)h_l \vec{U}_l) = -\frac{1}{\rho_l} \nabla \cdot [(1-\alpha)(q_l + q_l^i)] + \frac{(1-\alpha) Dp}{\rho_l Dt} + \frac{\Gamma_{lg, sat} - \Gamma_{gl}}{\rho_l} + \frac{q_w'' A_w''}{\rho_l},$$

где  $q_l + q_l^i$  – молекулярные и турбулентные потоки тепла для жидкости.  $\frac{D}{Dt}$  представляет собой полную производную. Третье слагаемое характеризует фазовый переход, а последнее представляет собой плотность теплового потока от стенки –  $q_w''$ ;  $A_w''$  – площадь поверхности теплообмена, отнесенная к единице объема [6].

5. Уравнения в частных производных для турбулентности в жидкой фазе:

$$v_l^{eff} = v_l + v_l',$$

$$v_l^{i,b} = \frac{1}{2} C_{\mu b} D_s \alpha \|\vec{U}_g - \vec{U}_l\|,$$

где значение константы  $C_{\mu b}$  [5, 6].

Замыкание системы уравнений происходит заданием значений коэффициента теплоотдачи при конденсации на поверхности сетевого теплообменника.

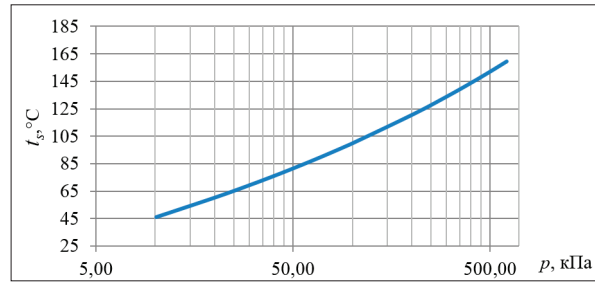


Рисунок 2 – График зависимости температуры насыщения воды от давления

Для определения эффективности работы котла необходимо использовать следующую методику теплового расчета:

1. Формирование геометрических и конструктивных параметров жаровой трубы, конвективного пучка, объема с разрежением вакуумного котла.

2. Моделирование виртуальной 3D-модели вакуумного котла с использованием специализированного программного комплекса.

3. Задание и расчет начальных, граничных условий. В качестве начальных условий используются теплофизические свойства теплоносителя, температура и давление.

4. Формирование и решение основных уравнений процессов течения реагирующих газов в топке и в конвективном пучке труб.

5. Формирование начальных и граничных условий с последующим расчетом основных уравнений, моделирующих тепло-массообменные процессы, протекающие при давлении ниже атмосферного – кипение на жаровой трубе и конденсации на сетевом теплообменнике.

6. Определение параметров тепловой эффективности вакуумного жаротрубного котла. Расчет коэффициента полезного действия котла по обратному балансу.

Определяющими теплофизическими характеристиками, влияющими на эффективную работу вакуумного котла, являются: коэффициент теплоотдачи; температура насыщения теплоносителя, которые также зависят от рабочего давления в котле; температура стенки; тепловые потери с уходящими газами.

В качестве теплоносителя в вакуумном котле используется вода, которая является промежуточным теплоносителем.

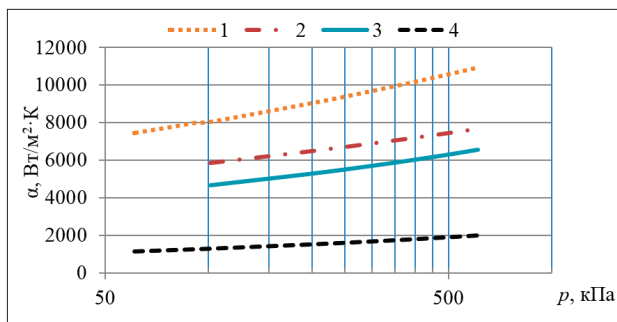


Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов теплоотдачи при кипении воды от рабочего давления различных авторов (1 – D. Brain Spalding, J. Taborek; 2 – В.И. Исаченко, В.А. Осипов, А.С. Сукомел; 3 – М.А. Михеев, И.М. Михеева; 4 – Nishikawa)

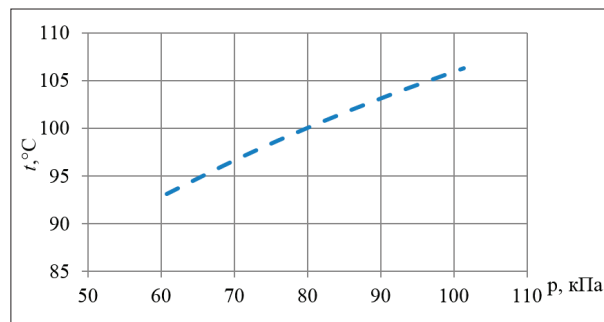


Рисунок 4 – Изменение значений температуры стенки со стороны воды в диапазоне давлений

На рисунке 2 представлен график зависимости температуры насыщения воды от давления. Данные получены с использованием расчетной зависимости Antoine.

Анализ результатов расчетов показал, что переход от атмосферного давления к разрежению характеризуется уменьшением температуры насыщения водяного теплоносителя.

Значение температуры насыщения является определяющим фактором при тепловом расчете вакуумного котла. В данном случае именно температура насыщения определяет температурный режим системы теплоснабжения. В данной работе ограничение давления происходит на значении 60, 80 кПа для поддержания стабильной температуры сетевого теплоносителя 60–80 °С. Впоследствии сетевой теплоноситель с данными температурными параметрами может использоваться для различных технологических нужд.

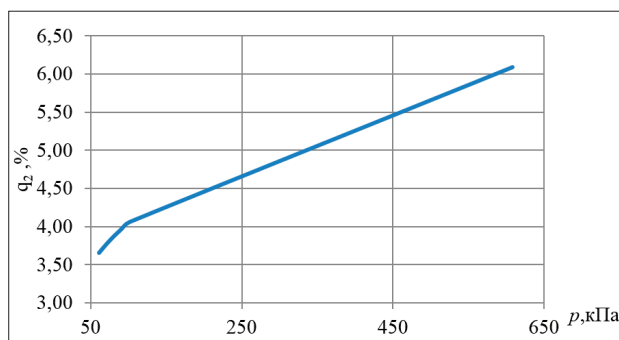


Рисунок 5 – Влияние тепловых потерь на величину уходящими газами

На рисунке 3 показаны значения, полученные в результате расчетного исследования коэффициента теплоотдачи в диапазоне давлений. Расчетная плотность теплового потока  $q = 50000 \text{ Вт/м}^2$ .

При снижении давления коэффициент теплоотдачи значительно уменьшается.

Переход от атмосферного давления к разрежению снижает температуру стенки теплообменной поверхности со стороны водяного кипящего теплоносителя, что приводит к снижению средней температуры в жаровой трубе и температуры газов на выходе (рисунок 4).

Во избежание возможных рисков возникновения низкотемпературной коррозии необходимо производить контроль значений температуры уходящих газов, выбирая рациональные значения.

Снижение значений температуры уходящих газов приводит к снижению тепловых потерь в пределах 2 % при снижении рабочего давления от 608 до 60 кПа (рисунок 5).

В результате проведенных расчетов установлено, что снижение рабочего давления от 608 до 60 кПа приводит к уменьшению температуры насыщения и снижению коэффициентов теплоотдачи при кипении в объеме жидкости. В связи с этим, происходит снижение температуры стенки со стороны воды, что оказывает влияние на температурное распределение в жаровой трубе и конвективном пучке, и как следствие, снижение температуры уходящих газов, что повышает эффективность работы вакуумного котла.

**Литература**

1. *Slobodina E.N.* Vacuum boiler elements temperature processes interrelation / E.N. Slobodina, A. G. Mikhailov, A.V. Razuvaev // AIP Conference Proceedings. 2018. № 2007. P. 1–5.
2. *Жидилов К.А.* Методика математического моделирования газового водогрейного котла / К.А. Жидилов, В.Ф. Киселев, В.В. Проворов, С.И. Ротков // Вестник ИжГТУ. 2008. № 3. С. 33–36.
3. *Rahmani A.* Numerical investigation of heat transfer in 4-pass fire-tube boiler / A. Rahmani, S. Trabelsi // American Journal of Chemical Engineering. 2014. № 2 (5). P. 65–70.
4. *Feldmann H.* Nucleate boiling in water for different pressures / H. Feldmann, A. Luke // International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. July 14–17, 2008.
5. *Михайлов А.Г.* Численное моделирование процессов тепломассопереноса при турбулентном горении газового топлива в топочном объеме / А.Г. Михайлов, Э.Э. Новикова, С.В. Тербилов, Е.Н. Слободина // Омский научный вестник. 2016. № 2 (146). С. 66–68.
6. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide.* Release 14.0/ ANSYS, Inc. // Southpointe 275 Technology Drive. Canonsburg: PA 15317, 2011. 370 p.