



УДК 621.18-5

**Чичурин Александр Геннадьевич**, доцент, к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок

Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Шураев Олег Петрович**, доцент, к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок

Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

### ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СУДОВОЙ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ РАБОТЕ НА ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

*Аннотация.* Рассмотрены теоретические положения, составляющие основу принципа регулирования подачи воздуха при работе котельной установки на водотопливной эмульсии. Показано, что при регулировании подачи воздуха в зависимости от содержания воды в водотопливной эмульсии возрастает тепловая эффективность котельной установки.

*Ключевые слова:* коэффициент избытка воздуха, адиабатная температура, тепловая эффективность, полнота сгорания топлива, водотопливная эмульсия

Рассмотрим тепловой баланс котельной установки. Теплота, вносимая в топку котла при механическом распыливании топлива, складывается из трех составляющих:

теплота, вносимая воздухом

$$Q_{air} = m_{air} \cdot c_{p\_air} \cdot (t_{air} - t_0),$$

где  $m_{air}$  – масса воздуха, подаваемого в топку, кг;  $c_{p\_air}$  – его изобарная теплоемкость, кДж/(кг К);  $t_0$  – базовая температура, например, 0°C;

теплота, вносимая топливом

$$Q_{fuel} = m_{fuel} \cdot c_{fuel} \cdot (t_{fuel} - t_0),$$

где  $m_{fuel}$  – масса топлива, подаваемого в топку, примем  $m_{fuel} = 1$  кг;  $c_{fuel}$  – теплоемкость топлива, кДж/(кг К);

и теплота, выделяющаяся при сгорании топлива, определяемая по одной из формул, в зависимости от коэффициента избытка воздуха (будем условно считать, что при  $\alpha \geq 1$  топливо сгорает полностью)

$$Q_{fire} = \begin{cases} Q_n \cdot \alpha \cdot m_{fuel} \cdot (\alpha < 1) & \text{при } \alpha < 1; \\ Q_n \cdot m_{fuel} \cdot (\alpha \geq 1) & \text{при } \alpha \geq 1. \end{cases}$$

где  $Q_n$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха.

Тогда можно записать

$$\begin{aligned} Q_a &= Q_{air} + Q_{fuel} + Q_{fire} = \\ &= m_{air} \cdot c_{p\_air} \cdot (t_{air} - t_0) + m_{fuel} \cdot c_{fuel} \cdot (t_{fuel} - t_0) + \end{aligned}$$

$$Q_H \cdot \alpha \cdot m_{fuel} \cdot (\alpha < 1) + Q_H \cdot m_{fuel} \cdot (\alpha \geq 1).$$

Пренебрегая потерями теплоты, оценим максимально возможную (адиабатную) температуру  $t_{ПСГ}$  в топке котла из выражения теплового баланса котла

$$Q_a = (m_{air} + m_{fuel}) \cdot c_{ПСГ} \cdot (t_{ПСГ} - t_0).$$

Различие адиабатной температуры в топке котла при работе на разных сортах топлива видно на графике (рис. 1), построенном для дизельного топлива (низшая теплота сгорания топлива  $Q_H = 42700$  кДж/кг и мазута  $Q_H = 39600$  кДж/кг. Из графика следует, что максимальной адиабатная температура будет при  $\alpha = 1$ . При неполном сгорании  $\alpha < 1$ , адиабатная температура в топке уменьшается вследствие неполучения теплоты несгоревшего топлива. При избытке воздуха ( $\alpha > 1$ ) адиабатная температура в топке резко снижается из-за необходимости нагрева «балластной» массы воздуха, которая не участвует в горении топлива.

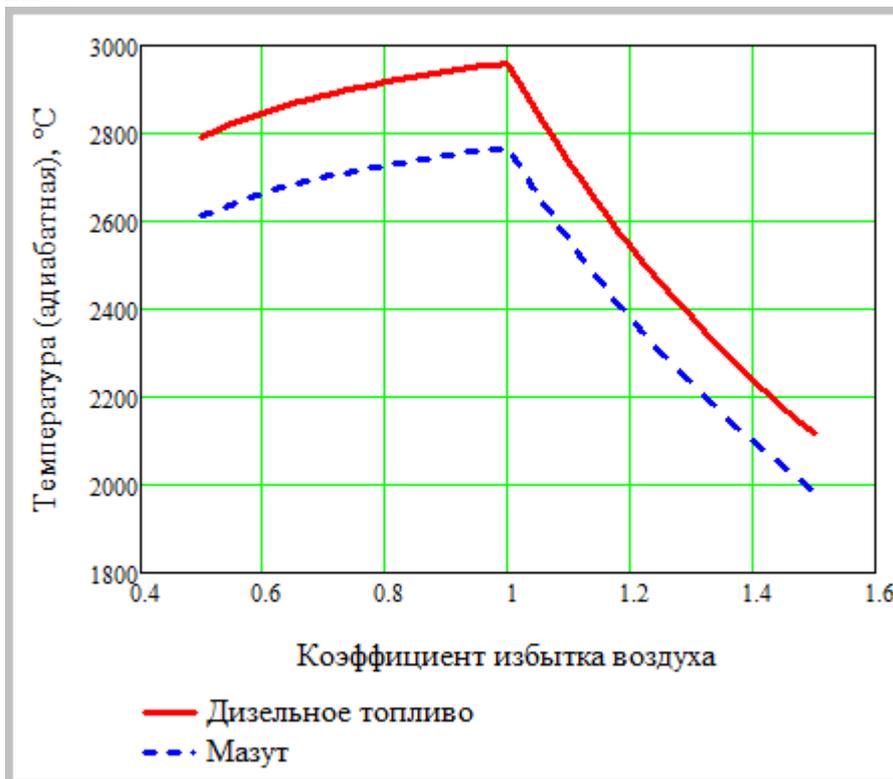


Рис. 1. Зависимость адиабатной температуры от коэффициента избытка воздуха

Также заметим, что с увеличением коэффициента избытка воздуха (например, от 1 до 2) уменьшается влияние теплоты сгорания топлива на величину адиабатной температуры в топке (в рассматриваемом примере от 190 до 100 °C).

Введем величину тепловой эффективности котла, которую будем оценивать по формуле

$$\eta_a = \frac{t_{ПСГ} - t_{ВЫХ}}{t_{ПСГ} - t_{air}},$$

где  $t_{ВЫХ}$  — температура на выходе из котла, примем  $t_{ВЫХ} = 300$  °C.

Разность значений тепловой эффективности в зависимости от используемого топлива показана на рис. 2. Из графика следует, что увеличением коэффициента избытка воздуха (например, также от 1 до 2) повышение calorificity топлива приводит к увеличению различия тепловой эффективности от 0.8 до 1.5%.

Так как водотопливные эмульсии (ВТЭ) наиболее часто применяются именно на базе мазута, дальнейшие рассуждения и расчеты будем проводить, принимая низшую теплоту сгорания  $Q_H = 39600$  кДж/кг. Рассмотрим влияние содержания воды в составе ВТЭ на адиабатную температуру и эффективность котла. Здесь мы не рассматриваем процесс сгорания ВТЭ, а сосредоточимся исключительно на calorimetric parameters. Со-

держание воды в ВТЭ будем варьировать от 0 (чистое топливо) до 25%. При сохранении неизменной подачи топлива/ВТЭ форсункой получим, что с увеличением доли воды в ВТЭ будет уменьшаться масса поступающего в топку топлива:

$$m_{f\_ВТЭ} = m_{fuel} - m_w.$$

В этом случае теплота, вносимая в топку котла, будет определяться как

$$Q_{a\_ВТЭ} = Q_{air} + Q_{fuel} + Q_w + Q_{fire} - Q_{zw},$$

где  $Q_w$  – теплота, вносимая в топку водой в составе ВТЭ;  $Q_{zw}$  – теплота, затрачиваемая на подогрев и испарение воды:

$$Q_w = m_w \cdot c_w \cdot (t_w - t_0),$$

$$Q_{zw} = m_w \cdot c_w \cdot (100^\circ\text{C} - t_0) + r \cdot m_w,$$

где  $c_w$  – теплоемкость воды, кДж/(кг К);  $r$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг.

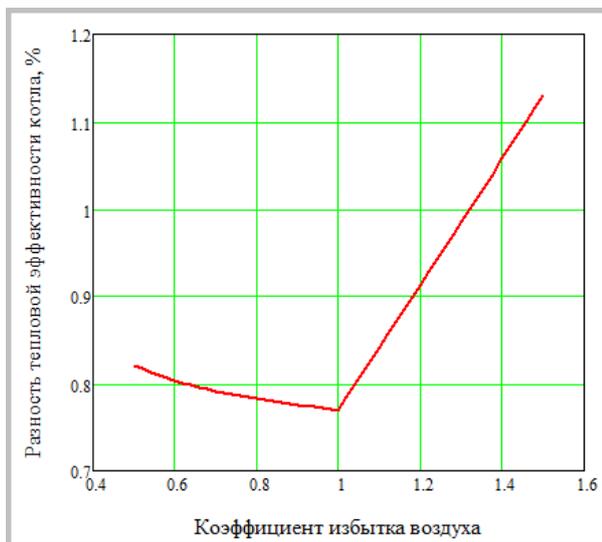


Рис.2. Разность тепловой эффективности котла при работе на дизельном топливе и мазуте в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Тогда выражение для теплоты, вносимой в топку котла, можно записать:

$$Q_{a\_ВТЭ} = m_{air} \cdot c_{p\_air} \cdot (t_{air} - t_0) + m_{fuel} \cdot c_{fuel} \cdot (t_{fuel} - t_0) + m_w \cdot c_w \cdot (t_w - t_0) + Q_H \cdot \alpha \cdot m_{fuel} \cdot (\alpha < 1) + Q_H \cdot m_{fuel} \cdot (\alpha \geq 1) - m_w \cdot (c_w \cdot (100^\circ\text{C} - t_0) + r).$$

При этом адиабатная температура в топке будет рассчитываться по выражению

$$t_{псг} = \frac{Q_{a\_ВТЭ}}{(m_{air} + m_{fuel}) \cdot c_{псг} + m_w \cdot c_s},$$

где  $c_s$  – теплоемкость пара, кДж/(кг К).

Графики, отражающие зависимость адиабатной температуры в топке от коэффициента избытка воздуха и содержания воды в ВТЭ приведены на рис. 3. Видно, что с увеличением содержания воды в ВТЭ снижается максимальная адиабатная температура в топке. Также с увеличением содержания воды в ВТЭ понижается тепловая эффективность котла (рис. 4).

У большинства судовых вспомогательных котлов воздушная заслонка во время работы котла находится в неподвижном, зафиксированном состоянии, которое определяется обычно в начале навигации по результатам замера параметров отходящих газов (температуры, содержания кислорода, угарного газа и т.п.) с помощью газоанализатора (в лучшем случае!). Тогда обратим внимание на следующий факт: при работе котла на ВТЭ с изменением концентрации воды изменяется и коэффициент избытка воздуха. Действительно, определяя коэффициент избытка воздуха как отношение

$$\alpha = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \cdot \frac{1}{L_0},$$

где  $L_0$  – теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг топлива, кг воздуха/кг топлива; в случае применения ВТЭ оно трансформируется в выражение

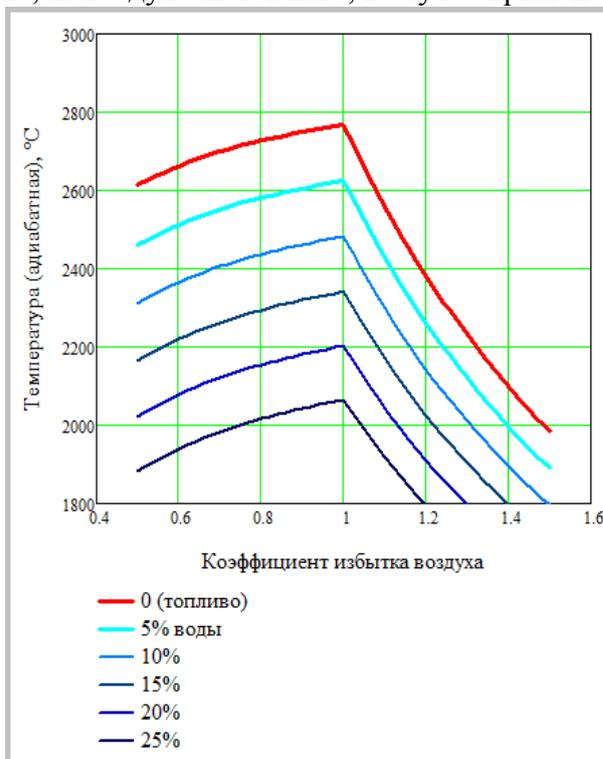


Рис. 3. Зависимость адиабатной температуры от коэффициента избытка воздуха и содержания воды в ВТЭ

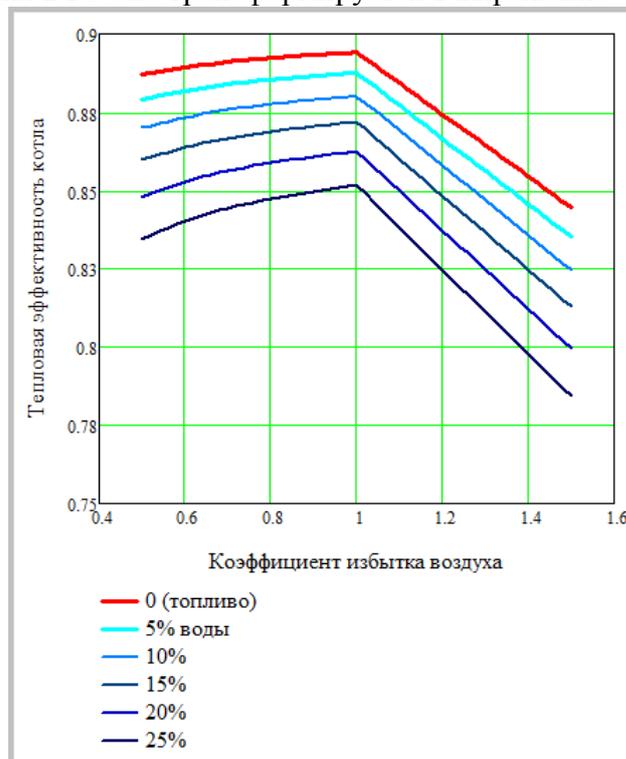


Рис. 4. Зависимость тепловой эффективности от коэффициента избытка воздуха и содержания воды в ВТЭ

$$\alpha_{\text{ВТЭ}} = \frac{m_{\text{air}}}{(m_{\text{fuel}} - m_w)} \cdot \frac{1}{L_0}$$

А так как  $m_w$  варьируется при работе котла (по различным причинам), то и  $\alpha_{\text{ВТЭ}}$  будет отличаться от того значения  $\alpha$ , на которое был настроен котел первоначально. И это отличие может быть весьма существенным: с увеличением содержания воды в ВТЭ возрастает и действительный коэффициент избытка воздуха (рис. 5).

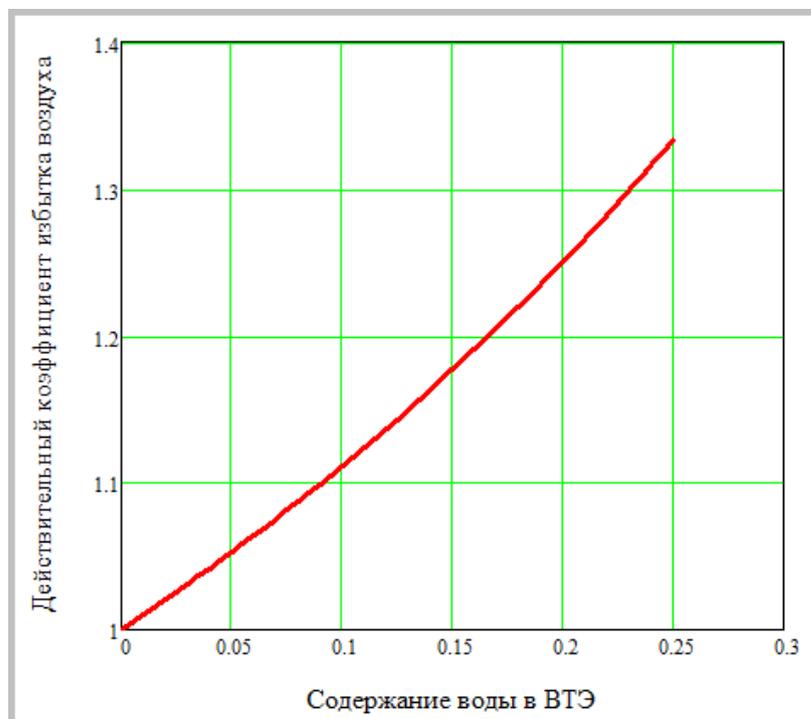


Рис.5. Действительный коэффициент избытка воздуха при работе котла на ВТЭ

Ранее было показано, что с увеличением коэффициента избытка воздуха снижается тепловая эффективность котельной установки. Следовательно, при работе котла на ВТЭ тепловая эффективность окажется ниже, чем при работе на чистом топливе не только потому, что на нагрев и испарение воды тратится дополнительное количество теплоты, но и потому, что котел оказывается на неоптимальном режиме с точки зрения коэффициента избытка воздуха. Исправить ситуацию можно, установив систему автоматического управления воздушной заслонкой или частотой вращения вала вентилятора. Параметром, по которому осуществляется регулирование, может быть содержание кислорода или температура отходящих газов – при неизменной площади теплообмена она будет четко связана с температурой в топке.

Нанесем на графики зависимости адиабатной температуры и тепловой эффективности от коэффициента избытка воздуха и содержания воды в ВТЭ режимы работы котла без регулирования количества подаваемого воздуха и при наличии такого регулирования (рис. 6 и 7).

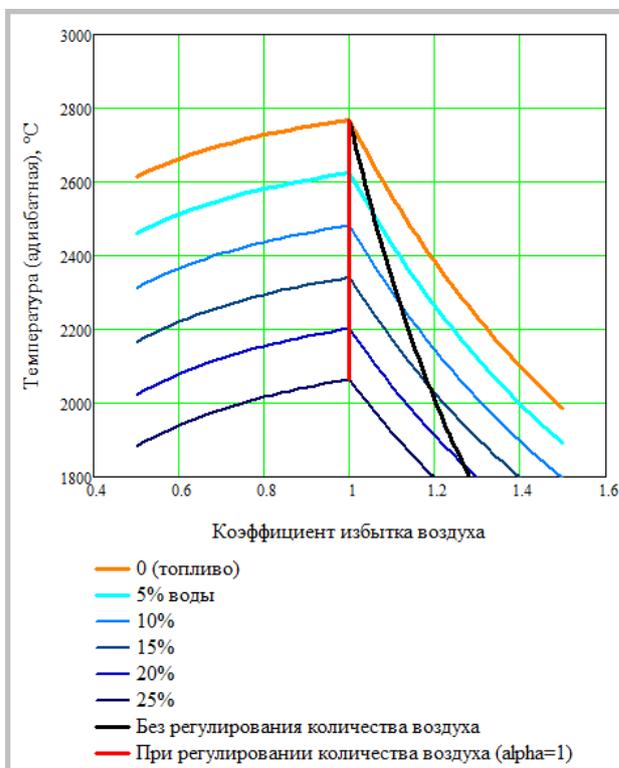


Рис. 6. Адиабатная температура в точке без регулирования и при регулировании коэффициента избытка воздуха в зависимости содержания воды в ВТЭ

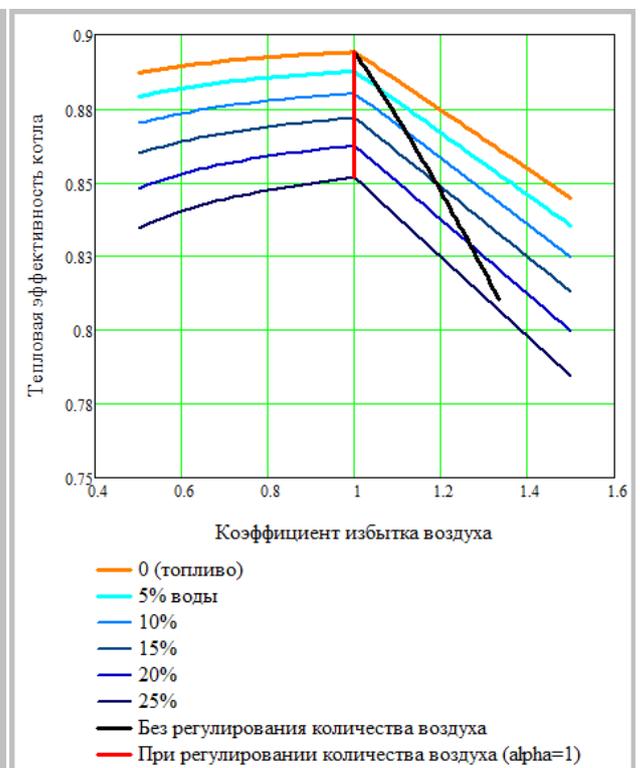


Рис. 7. Тепловая эффективность котла без регулирования и при регулировании коэффициента избытка воздуха в зависимости содержания воды в ВТЭ

В случае регулирования количества подаваемого воздуха возможно поддержание режимов работы котла с коэффициентом избытка воздуха, близким к 1. При регулировании коэффициента избытка воздуха согласно изменению количества топлива в составе ВТЭ получаем повышение тепловой эффективности котла, причем выигрыш тем больше, чем больше содержание воды в ВТЭ. Например, при содержании воды в составе ВТЭ 10% тепловая эффективность котла без регулирования подачи воздуха составит 0.866, тогда как при регулировании, исходя из критерия регулирования  $\alpha \rightarrow 1$ , она будет 0.887, т.е. имеет место увеличение тепловой эффективности на 0.02 (2%). При содержании воды 20% тепловая эффективность без регулирования подачи воздуха будет 0.863, а при регулировании - 0.826, т.е. увеличение тепловой эффективности составляет 0.037 (3.7%).

Конструкция котельной установки с регулированием подачи воздуха в зависимости от содержания воды в ВТЭ защищена патентом на полезную модель [1].

### Список литературы:

1. Котельная установка. Патент на полезную модель №191001 /Чичурин А.Г., Шураев О.П., Чичурин А.А.// Россия, МПК F22B 31/00 (2006.01), F22B 33/00 (2006.01) - Заявка № 2019112712. Заявл. 25.04.2019; Оpubл. 18.07.2019, Бюл. №20.

## INFLUENCE OF THE EXCESS AIR COEFFICIENT ON THE EFFICIENCY OF THE SHIP'S BOILER PLANT WHEN WORKING ON A WATER-FUEL EMULSION

Alexandr G. Chichurin, Oleg P. Shurayev

*The theoretical provisions that form the basis of the principle of regulating the air supply during the operation of a boiler plant on a water-fuel emulsion are considered. It is shown that when regulating the air supply, depending on the water content in the water-fuel emulsion, the thermal efficiency of the boiler plant increases.*

*Keywords: excess air coefficient, adiabatic temperature, thermal efficiency, fuel combustion completeness, water-fuel emulsion.*