Как категорически нельзя считать расходы топлива турбоагрегатов ТЭЦ

В № 6 (62) журнала «Энергосбережение и водоподготовка» за 2009 год вышла статья М.М. Султанова и В.С. Кузеванова «Разработка и апробация метода оптимизации режимов работы энергетического оборудования ТЭЦ». В примечании редакции на стр. 24 указано, что статья опубликована в порядке обсуждения. Нижеследующий текст является ее анализом в рамках предложенной дискуссии.

Формулы из обсуждаемой статьи, которые приводятся в настоящем тексте, имеют двойную нумерацию – оригинальный номер выделен жирным шрифтом. Используются следующие обозначения: Q_T – тепловая мощность (МВт), $N_Э$ – электрическая мощность (МВт), B – расход топлива. Индекс i нумерует отборы пара, $m = 1{,}2{,}3$ – их общее число, Q_{Ti} – тепловая мощность i – го отбора, $Q_T = \sum_{i=1}^{m} Q_{Ti}$. Значки «ном», «б», «к» и «00» указывают на номинальный, базовый, конденсационный и произвольный режимы турбоагрегата.

1. Методика определения расхода топлива

В статье используются формулы для коэффициента использования теплоты топлива

$$\eta_{ИТ} = \frac{N_Э + Q_Т}{Q_Г^С} \qquad (1)(\mathbf{1})$$

и коэффициента, введенного АО «Фирма ОРГРЭС» для разделения расхода топлива между выработкой электричества и тепла:

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_{ТЭЦ}^{Э}}{\eta_{ТЭЦ}^{Т}} \qquad (2)(\mathbf{4})$$

где $Q_Г^С$ – мощность, выделяющаяся при сгорании топлива, $\eta_{ТЭЦ}^{Э}$ и $\eta_{ТЭЦ}^{Т}$ – КПД выработки двух видов энергии.

Результаты авторов излагаются после заголовка: «Методика оценки энергетической эффективности режимов работы оборудования ТЭЦ». Они основаны на следующей формуле,

$$\Delta B = k \cdot \left(\frac{\Delta N_Э}{\tilde{\eta}} + \Delta Q_Т \right) \qquad (3)(\mathbf{7})$$

О коэффициентах k и $\tilde{\eta}$ сказано, что они зависят от задействованных отборов пара и определяются по параметрам двух режимов работы турбоагрегата – номинального и т.н. базового. При этом базовый режим «б» определен существенно *неоднозначно*. От него требуется только, чтобы турбоагрегат можно было перевести в конденсационный режим

($Q_{\text{Т}} = 0$) при постоянной мощности котла. Очевидно, что таких «базовых режимов» существует бесконечно много. Любой режим является базовым, если мощность котла не слишком велика, чтобы при перекрытии отборов пара мощность электрогенератора не превысила предельно допустимой величины. Соответственно, конденсационный режим «к» определен неоднозначно.

Таким образом, расчетные формулы зависят от *произвольно* выбираемых параметров. «Методика» не поясняет: какой режим из бесконечно многих вариантов можно использовать, как базовый? Если допускается любой из них, то откуда следует, что результат вычислений не зависит от выбора базового режима? Этот естественный вопрос в статье не освещается, ответ на него можно извлечь из рассуждений вокруг формулы (14).

Как видно из сравнения с формулами (12) [1] и (2.24),(2.25) [2], формула (**6**) содержит опечатку – в числителе дроби вместо Q_T^0 должно быть Q_{Ti}^0 (в противном случае (**6**) ведет к абсурду). В дальнейшем будет видно, откуда эта формула взялась.

Для вычисления k и $\tilde{\eta}$ в (3) «методика» предлагает следующие формулы:

$$k = (B^{\text{ном}} - B^{\text{б}}) \Big/ \left(\frac{N_{\text{Э}}^{\text{ном}} - N_{\text{Э}}^{\text{б}}}{\tilde{\eta}^{\text{б}}} + Q_{\text{Т}}^{\text{ном}} - Q_{\text{Т}}^{\text{б}} \right) \qquad (4)(\mathbf{9})$$

$$\tilde{\eta}^{\text{б}} = \bar{\eta}_0 \frac{\sum_{i=1}^{m} K_i \cdot (Q_{\text{Т}i}^{\text{ном}} - Q_{Ti}^{\text{б}})}{Q_{\text{Т}}^{\text{ном}} - Q_T^{\text{б}}} \qquad (5)(\mathbf{11})$$

$$\bar{\eta}_0 = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{к}} - N_{\text{Э}}^{\text{б}}}{\sum_{i=1}^{m} K_i \cdot Q_{\text{Т}i}^{\text{б}}} \qquad K_i = \frac{1 - T_{\text{к}}/\gamma T_{\text{отб},i}}{1 - T_{\text{к}}/T_{\text{о}}} \qquad (6)$$

$T_{\text{о}}$ – температура пара на входе в турбоагрегат, $T_{\text{к}}$ – температура конденсата, $T_{\text{отб},i}$ – температура пара i – го отбора, $i = 1, \ldots, m$. Для произвольного режима «00»:

$$\tilde{\eta}^{00} = \bar{\eta}_0 \frac{\sum_{i=1}^{m} K_i \cdot (Q_{\text{Т}i}^{\text{ном}} - Q_{Ti}^{00})}{Q_{\text{Т}}^{\text{ном}} - Q_T^{00}} \qquad (7)(\mathbf{12})$$

$$B^{00} = B^{\text{ном}} \cdot \left[1 - \frac{\tilde{\eta}^{\text{б}}}{\tilde{\eta}^{00}} \cdot \left(1 - \frac{B^{\text{б}}}{B^{\text{ном}}} \right) \cdot \frac{R^{\text{ном}} - R^{00} - (1 - \tilde{\eta}^{00}) \cdot (Q_T^{\text{ном}} - Q_T^{00})}{R^{\text{ном}} - R^{\text{б}} - (1 - \tilde{\eta}^{\text{б}}) \cdot \left(Q_T^{\text{ном}} - Q_T^{\text{б}} \right)} \right] \qquad (8)(\mathbf{10})$$

где $R = N_{\text{Э}} + Q_{\text{Т}}$ – полная мощность турбоустановки. В формуле (8) заключается то, что авторы считают новым методом определения расхода топлива. На (8) основаны тривиальные рекомендации в отношении оптимального распределения нагрузки между турбоустановками ТЭЦ, описанные в конце статьи.

2. Ошибки и противоречия.

Анализ этой «методики» начнем с замечания о том, что, вопреки утверждению в статье, формула (3) не вытекает из (**1**) и (***5***) (в [1] авторы утверждают, что (3) получается из (1)). В этой и других работах на ту же тему не объясняется [1,2], как получились ключевые формулы (3),(7), из которых с помощью элементарных преобразований получаются все остальные. Попробуем в этом разобраться.

Рассмотрим случай, когда при переходе из режима «0» в режим «00» мощность котла не меняется, т.е., происходит переброс части тепловой мощности на электрическую или обратно.

Если коэффициент $\bar{\eta}$ (2) не зависит от режима работы турбоустановки, то:

$$N_{\text{Э}}^{00} - N_{\text{Э}}^{0} = \bar{\eta} \cdot (Q_T^0 - Q_{\text{Т}}^{00}) \qquad (9)$$

В самом деле, с учетом (2) формула (9) равносильна уравнению

$$\frac{N_{\text{Э}}^{00} - N_{\text{Э}}^{0}}{\eta_{\text{ТЭЦ}}^{\text{Э}}} = \frac{Q_T^0 - Q_{\text{Т}}^{00}}{\eta_{\text{ТЭЦ}}^{\text{Т}}}$$

которое выражает баланс тепловой энергии пара. А именно: часть мощности котла, которая пошла на увеличение выработки электроэнергии (или тепла), равна той части его мощности, за счет которой снизился отбор тепла (или электроэнергии). Если коэффициент $\bar{\eta}$ является переменным, то в (9) стоит его среднее значение.

Сходство символов $\tilde{\eta}$ и $\bar{\eta}$ связано с тем, что коэффициент $\tilde{\eta}$ является модификацией $\bar{\eta}$ (2), посредством которой авторы пытались учесть зависимость эффективности выработки электроэнергии от различий между отборами пара. Исходная идея станет понятной, если переписать (9) в виде $\Delta N_{\text{Э}} = -\sum_{i=1}^{m} \bar{\eta} \Delta Q_{Ti}$ (поскольку $Q_{\text{Т}} = \sum_{i=1}^{m} Q_{\text{Т}i}$). В этом уравнении нет разницы между отборами, которые нумерует индекс i.

Авторы предположили, что различие отборов по состоянию пара влияет на зависимость $N_{\text{Э}} = N_{\text{Э}}(Q_{\text{Т}})$, и это влияние можно описать формулой $\Delta N_{\text{Э}} = -\sum_{i=1}^{m} \eta_i \Delta Q_{Ti}$, т.е., используя вместо $\bar{\eta}$ некоторый коэффициент η_i, зависящий от отбора. Об этом свидетельствует уравнение (10), вытекающее из следующих формул:

$$\eta_{\text{ИТ}}^{\text{тек}} = \frac{N_{\text{Э}}^{0} + (Q_{\text{Т}}^{0} - Q_{\text{Т}}^{\text{тек}}) \cdot \tilde{\eta}^{0} + Q_{\text{Т}}^{\text{тек}}}{B^{0} \cdot Q_{\text{Н}}^{0}} \quad (\mathbf{5}) \qquad \tilde{\eta}^{0} = \bar{\eta}^{0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{m} \tilde{\eta}_i^{0} \cdot (Q_{Ti}^{0} - Q_{\text{Т}i}^{\text{тек}})}{Q_T^0 - Q_{\text{Т}}^{\text{тек}}} \quad (\mathbf{6})$$

где «тек» обозначает текущий (произвольный), а «0» – исходный режим (также произвольный). С учетом (1) из $(\mathbf{5})$ следует $N_{\text{Э}}^{\text{тек}} - N_{\text{Э}}^{0} = \tilde{\eta}^{0}(Q_{\text{Т}}^{0} - Q_{\text{Т}}^{\text{тек}})$, где $\tilde{\eta}^{0}$ обозначает коэффициент $\tilde{\eta}$ в режиме «0», после чего из $(\mathbf{6})$ вытекает:

$$N_{\text{Э}}^{\text{тек}} - N_{\text{Э}}^{0} = \bar{\eta}_0 \cdot \sum_{i=1}^{m} \tilde{\eta}_i^0 \cdot (Q_{Ti}^{0} - Q_{\text{Т}i}^{\text{тек}}) \qquad (10)$$

Из (10) видно, что $\eta_i = \bar{\eta}_0 \cdot \tilde{\eta}_i^0$. Утверждается, что коэффициенты $\tilde{\eta}_i^0$ определяют эффективность выработки электроэнергии при частичных нагрузках отпуска тепла. Эта расплывчатая фраза означает, что величина $\Delta N_{\text{Э}i} = -\bar{\eta}_0 \tilde{\eta}_i^0 \Delta Q_{Ti}$ равна той части приращения (или уменьшения) электрической мощности, которая обусловлена уменьшением (или приращением) тепловой мощности i – го отбора. Физическая осмысленность разложения $\Delta N_{\text{Э}} = \sum_{i=1}^{m} \Delta N_{\text{Э}i}$ отнюдь не очевидна – оно является весьма сырой гипотезой, которую авторы не потрудились явно сформулировать [1,2].

Из 1-й формулы (6) следует, что переходу из базового режима в конденсационный отвечает уравнение $\Delta N_{\text{Э}} = -\bar{\eta}_0 \sum_{i=1}^{m} K_i \, \Delta Q_{\text{Т}i}$. Сравнивая с формулой (10) видим, что $\tilde{\eta}_i^0 = K_i$ (6).

Таким образом, предлагается заменить формулу $\Delta N_{\text{Э}} = -\bar{\eta} \sum_{i=1}^{m} \Delta Q_{Ti}$ формулой

$$\Delta N_{\text{Э}} = -\bar{\eta}_0 \sum_{i=1}^{m} K_i \, \Delta Q_{\text{Т}i} \qquad (11)$$

где числа K_i определены в (6). При этом используется параметр γ, имеющий бессодержательное описание: «*коэффициент, определяемый параметрами базового режима*». По-видимому следует считать, что $\gamma T_{\text{отб},i}$ – это температура пара i - го отбора. Тогда числа $\propto = 1 - T_{\text{к}}/T_{\text{о}}$ и $\alpha_i = 1 - T_{\text{к}}/\gamma T_{\text{отб},i}$ равны КПД Карно для установки в целом и ее части после i - го отбора (в базовом режиме). По-видимому авторы предположили, что параметры η_i пропорциональны α_i, а в сумме

$$\sum_{i=1}^{m} \eta_i \Delta Q_{Ti} = \sum_{i=1}^{m} \bar{\eta}_0 \tilde{\eta}_i^0 \, \Delta Q_{\text{Т}i} = \sum_{i=1}^{m} K_i \, \bar{\eta}_0 \Delta Q_{\text{Т}i}$$

числа $K_i = \propto_i / \propto$ играют роль весовых коэффициентов (ненормированных, т.к. их сумма не равна 1). Как-то иначе объяснить (11) вряд ли возможно, а в обсуждаемой статье и [1,2] физические пояснения к математическим манипуляциям отсутствуют.

Для определения параметра $\bar{\eta}_0$ следует рассмотреть переход из базового в конденсационный режим и, применив (11), зафиксировать значение $\bar{\eta}_0$ в силу (6).

Авторы также предположили, что коэффициент $\bar{\eta}$ (2), определяющий зависимость $\Delta N_Э = -\bar{\eta}\Delta Q_T$ при постоянной мощности котла, можно заменить на «более точный» коэффициент $\tilde{\eta}$, учитывающий различие между отборами. Роль $\tilde{\eta}$ аналогична: $\Delta N_Э = -\tilde{\eta}\Delta Q_T$. Корректное определение для $\tilde{\eta}$ отсутствует, но в силу (11) необходимо принять формулу (12), которая также следует из (2.24) и (2.25) [2] :

$$\tilde{\eta} = \bar{\eta}_0 \sum_{i=1}^{m} K_i \frac{\Delta Q_{Ti}}{\Delta Q_T} \qquad (12)$$

Формулы (5) и (7) получаются из формулы (12), примененной к переходам из номинального в базовый и произвольный режимы.

На первый взгляд, идея считать коэффициенты η_i пропорциональными α_i кажется разумной. Ее суть в том, что прирост мощности отбора с большей температурой пара сильней снижает мощность турбоустановки, чем такой же прирост мощности более холодного отбора. За меру такого различия принято отношение КПД Карно частей турбины, расположенных после отборов. Но авторы не предъявили никаких теоретических расчетов, оценок и экспериментальных данных для обоснования этой фантазии, и даже не решились ее внятно сформулировать [1,2].

Таким образом, эвристическое выражение (6) для K_i положено в основу «нового метода», как надежно установленный, научный факт. Сама идея коэффициента $K_i = \propto_i/\propto$ весьма сомнительна, т.к. при расчетах паровых турбин идеальный цикл Карно не применяется (применяется, например, цикл Ренкина). При $\Delta Q_{Ti} = \Delta Q_{Tj}$ отношение α_i/α_j отлично от $\Delta N_{Эi}/\Delta N_{Эj}$ еще и потому, что отбор более горячего пара дополнительно снижает мощность установки за счет большей длины той части турбины, на которую он мог бы оказать давление. Этот эффект авторы не заметили.

Из формулы (3), примененной к переходам из номинального в базовый и произвольный режимы, с учетом (5) и (7) элементарно получаются (4) и (8). Формула (8) является главным результатом обсуждаемой статьи и [1,2].

Уравнение (3) несовместимо с $\Delta N_Э = -\tilde{\eta}\Delta Q_T$, т.к. в последнем случае правая часть (3) равна нулю, в силу чего «метод оптимизации» теряет смысл. Это противоречие можно

устранить, полагая по аналогии с $\bar{\eta}$ (9), что $\tilde{\eta}$ является коэффициентом пропорциональности между $\Delta N_Э$ и ΔQ_T *только* в том случае, когда при изменении режима $\Delta B = 0$. Но тогда оптимизация расходов B, являющаяся целью обсуждаемой статьи и [1,2], также теряет смысл. На этом можно было бы закончить рассмотрение «методики», которая сама себе столь грубым образом противоречит.

Но остается вопрос: откуда взялась формула (3)? Подсказкой служит уравнение (2.6) [2], с которого начинается «методика определения расхода топлива…»:

$$dB = \frac{\partial B}{\partial N_Э} dN_Э + \frac{\partial B}{\partial Q_Т} dQ_Т$$

где $B = B(N_Э, Q_Т)$. В (2.7) [2] это уравнение переписано в следующем виде:

$$dB = k \cdot \left(\frac{dN_Э}{\tilde{\eta}} + dQ_Т\right) \quad k = \frac{\partial B}{\partial Q_T} \quad \tilde{\eta} = \frac{\partial B}{\partial Q_T} \Big/ \frac{\partial B}{\partial N_Э} \qquad (13)$$

Очевидно, что (3) есть обобщение (13). Если $\Delta B \approx 0$, то из (13) $\tilde{\eta} \approx \Delta N_Э / \Delta Q_Т$. Это противоречит определению $\tilde{\eta}$, согласно которому $\tilde{\eta} \approx -\Delta N_Э / \Delta Q_Т$. Кроме того, по определению частной производной приращение любой из мощностей $N_Э$ и $Q_Т$ должно было вычисляться в предположении, что другая остается неизменной.

Таким образом, определенная в (13) величина $\tilde{\eta}$ не имеет ничего общего с коэффициентом $\tilde{\eta}$, который фигурирует в (5), (7) и (12). То же относится к (3), поэтому результирующая формула (8) получена из противоречащих друг другу формул.

Рассмотрим два последовательных перехода: сначала из режима «1» в режим «2», а затем из «2» в режим «3», тогда для результирующего перехода из «1» в «3»: $\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2$, $\Delta N_Э = \Delta N_{Э1} + \Delta N_{Э2}$, $\Delta Q_Т = \Delta Q_{Т1} + \Delta Q_{Т2}$ и $\Delta B = k \cdot (\Delta N_Э / \tilde{\eta}^1 + \Delta Q_Т)$. С другой стороны $\Delta B_1 = k \cdot (\Delta N_{Э1} / \tilde{\eta}^1 + \Delta Q_{Т1})$ и $\Delta B_2 = k \cdot (\Delta N_{Э2} / \tilde{\eta}^2 + \Delta Q_{Т2})$, откуда

$$k \cdot (\Delta N_{Э1} / \tilde{\eta}^1 + \Delta N_{Э2} / \tilde{\eta}^2 + \Delta Q_{Т1} + \Delta Q_{Т2}) = k \cdot ((\Delta N_{Э1} + \Delta N_{Э2}) / \tilde{\eta}^1 + \Delta Q_{Т1} + \Delta Q_{Т2})$$

Отсюда следует, что $\tilde{\eta}^1 = \tilde{\eta}^2$. Параметр k является константой (4), поскольку базовый и конденсационный режимы считаются фиксированными. Таким образом, из формулы (3) и того факта, что коэффициент $\tilde{\eta}$ определяется только параметрами режима, непосредственно следует, что $\tilde{\eta}$ – *константа*. Учитывая допустимые погрешности условие $\tilde{\eta} = const$ можно ослабить до $|\Delta\tilde{\eta}|/\tilde{\eta} \ll |\Delta N_Э|/N_Э$, но это не изменит следующий вывод.

Формула (3) имеет практический смысл *только* в том случае, когда она является линеаризацией функции $B = B(N_Э, Q_Т)$ вблизи исходного режима. Однако, «методика» рассматривает переходы между произвольными режимами, а зависимость (3) считается нелинейной, т.к. $\tilde{\eta}$ зависит от режима (7). Для того, чтобы сохранить формулу (3), придется отбросить формулы (4) – (8). После этого от «методики» останется только линейная зависимость $\Delta B = a\Delta N_Э + b\Delta Q_Т$, описывающая переходы из исходного в близкие режимы. Константы a, b можно определить, измеряя $B, N_Э, Q_Т$ в двух близких режимах. Ясно, что эта тривиальная «идея» не представляет никакой научной, а также практической ценности.

Анализу грубых ошибок и противоречий, скрытых в (4) – (8), можно было бы посвятить обширную статью. Рассмотрим еще одну, которой достаточно для того, чтоб признать «методику» несостоятельной безотносительно к другим ее проблемам.

Если параметры K_i не совпадают между собой, то, выбирая режим «00» как угодно близко к «ном», из (7) можно получить *любое* значение $\tilde{\eta} = \tilde{\eta}^{00}$. В самом деле, полагая $Q_{Ti}^{ном} - Q_{Ti}^{00} = \varepsilon C_i$ при $\varepsilon \to 0$ в пределе получим:

$$\tilde{\eta}^{00} = \bar{\eta}_0 \frac{\sum_{i=1}^{m} K_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^{m} C_i} \qquad (14)$$

Дробь в (14) может принимать любые значения, в зависимости от $C_1, \dots, C_m$.

С практической точки зрения это означает, что «методика» не гарантирует получение сколько-нибудь правдоподобных значений B даже в как угодно близких к номинальному режимах. Вследствие (12), сказанное относится к любым режимам.

При этом таблица 2 демонстрирует отличную близость расчетных расходов топлива к фактическим. Однако, режимы из таблицы 2 не встречаются в таблицах 3.7 и 3.8 на стр. 89 – 94 диссертации [2], в которых собраны многочисленные и круглосуточные показания датчика расхода газа в январе и феврале 2010. Возникает естественный вопрос: когда и где были замерены расходы топлива в таблице 2, при которых турбоагрегаты якобы работали в режимах, мощности которых *кратны* 5 МВт? Сведений об этом нет нигде, поэтому разумно предположить, что данные в таблице 2 не связаны с реальными экспериментами и были каким-то образом подогнаны.

3. О поправочном коэффициенте.

Вернемся к параметру γ в формуле (6). В статье ничего не сказано о том, откуда можно получить его значение. В диссертации [2] предлагается сложный рецепт для вычисления γ, но внятных пояснений относительно физического смысла нет. На стр. 47 утверждается, что γ – это «*поправочный коэффициент, корректирующий термодинамическую модель в режимах данной турбины*». Стоит отметить, что базовый режим здесь уже не упоминается (см. выше). Не ясно, о какой модели идет речь, поскольку в [2] отсутствует термодинамика. За исключением сомнительной, эвристической формулы (6) для K_i, *все* уравнения получены за счет математических манипуляций, которые уместно назвать трюками. В этой связи уместно процитировать высказывание на стр. 42 [2]: «*Заметим, нам интересна только форма связи важных параметров, значение же коэффициента использования топлива* $\eta_{\text{ИТ,ТУ}}$*, его физический смысл, правомерность его применения для оценки произвольного процесса не оказывает влияния на последующий анализ*». Такая странная, если не называть ее безграмотной, методология закономерно оказалась полностью несостоятельной.

В автореферате к диссертации [2] дано третье пояснение, отличное от двух других: «γ – *коэффициент отклонения теплофизических параметров отбора пара от номинальных*». Рассмотрим рассуждения в [2], ведущие к рецепту вычисления этого параметра. Впервые он появляется в формуле (2.26) [2], совпадающей с 2-й формулой (6). Выше на стр. 43 [2]: «*примем в качестве модельного представления дополнительную взаимосвязь рассматриваемых параметров в виде*:

$$\eta^{\text{ов}}_{\text{ИТ,ТУ}} - \eta^{0}_{\text{ИТ,ТУ}} = b \cdot \Delta Q_T \cdot \left.\frac{\partial \eta_{\text{ИТ,ТУ}}}{\partial B}\right|_{N^0_Э, B^0} \qquad (15)$$

где b *– постоянная, причем* b *является конструктивно-технологической характеристикой конкретной турбины и не зависит от* $N_Э, Q_Т, \tilde{\eta}$». Ссылка на загадочное «модельное представление» не объясняет, на каком основании постулировано уравнение (15). При близости режимов «ов» и «0», в соответствии с (15), должно быть $\Delta B \approx b \cdot \Delta Q_T$. Поэтому тот факт, что b – единая для всех режимов константа, противоречит формуле (8). Кроме того, на рис. 2.1 [2] видно, что при переходе меняются $N_Э$ и B, поэтому $\Delta\eta_{\text{ИТ,ТУ}}$ нельзя считать по формуле (15).

Итак, уравнение (15) не имеет под собой оснований, если не считать таковым ссылку на «модельное представление», которая используется в [2] для оправдания волюнтаристских формул. Еще одним примером служит уравнение (2.17):

$$k = \left[\frac{N_Э^0 + Q_T^0}{B^0} + \frac{1-\tilde{\eta}}{b}\right]^{-1} \qquad (16)$$

Как утверждается, (16) дает «*усредненное значение коэффициента* $k = \partial B/\partial Q_T$ *при* $N_Э^0 = const$ *для произвольного интервала тепловых нагрузок*». Из формулы (16), примененной к переходу из номинального режима в базовый, получается выражение (2.20) для k. Сказано, что нужно приравнять его выражению (4) и в полученное уравнение подставить b из формулы (2.31), которая выглядит так:

$$b = \frac{\tilde{\eta}^к - 1}{\frac{Q_T^б}{B^к - B^б} + \frac{N_Э^б}{B^к}} \qquad \tilde{\eta}^к = \frac{N_Э^k - N_Э^б}{Q_T^б} \qquad (17)$$

Утверждается, что в результате получатся уравнения (2.32) и (2.33) для параметра γ :

$$\gamma = Z_2^*/\big(1 - X(1 - Z_2)\big) \qquad Z_7 \cdot X + Z_3 = Z_4 + Z_5 - Z_5 \cdot Z_8 \cdot X^{-1} \qquad (18)$$

Числа Z определяются громоздкими выражениями (2.34), в которых фигурируют величины $B, N_Э, Q_Т$ в номинальном, базовом и конденсационном режимах, температуры $T_о$, $T_{отб,i}$,$T_к$ (см. выше), а также искомый параметр γ. При этом утверждается, что в 1-м уравнении (18) число γ выражается через 1-й корень 2-го уравнения (18). Почему следует выбирать первый корень X – не поясняется. Анализ уравнений (18) в [2] отсутствует. Очевидно, что автор мог столь же безосновательно объявить параметр γ выражающимся через последний корень X (18).

Не проверяя выкладки, которые якобы ведут к (18) (в работе [2] их нет), отметим очевидные нелепости. «Усредненное значение» (16) для коэффициента k, даже если бы оно было получено корректно, нельзя приравнивать «точному значению» k в (4). Последнее, в свою очередь, несовместимо с $k = \partial B/\partial Q_T$. Выражение (17) для $\tilde{\eta}^к$ противоречит (7), где «00» обозначает *произвольный* режим. Выражение (17) для *константы* b (см. выше) зависит от $N_Э, Q_Т$ в базовом режиме, который определен неоднозначно (даже при фиксированном конденсационном). Впрочем, все это не так важно на фоне того, что, согласно понятию базового режима, должно быть $B^к = B^б$. Последнее означает *ноль в знаменателе* в 1-й формуле (17) !

Исходя из сказанного можно утверждать, что метод вычисления параметра γ, описанный в [2], является бессмысленным. Не удивительно, что примеры численного решения уравнений (18) не были предъявлены. В конце стр. 80 – начале стр. 81 [2] приводятся значения γ для 4-х турбоустановок и утверждается, что они найдены из формул (18). Однако проверить это

невозможно, поскольку в таблице 3.2 [2] не указаны температуры пара в отборах. Как видно из этой таблицы, коэффициенты K_1, K_2, K_3 у 4-х установок совпадают, хотя некоторые из них не применяются из-за отсутствия отборов пара. Но если параметры K_i совпадают у всех турбоагрегатов, то для чего были нужны 2-я формула (6) и нелепый метод вычисления параметра γ [2], которому авторы так и не дали внятного определения?

4. Заключение.

В таблице 2 демонстрируется отличное попадание расчетных данных, якобы полученных по формуле (8), в фактические значения расхода B^{00} на установках Волжской ТЭЦ. Однако, отсутствуют значения параметров, по которым проводились эти вычисления. Такими параметрами являются $N_Э, Q_Т, Q_{Тi}, B, T_{отб,i}$ базового и конденсационного режимов. Как уже отмечалось, базовый режим может быть выбран произвольно. В тексте [2] нет сведений о базовых режимах, использованных в таблицах 3.7 и 3.8. Таким образом, проверить эти вычисления невозможно.

Исходя из вышесказанного можно утверждать, что в обсуждаемой статье авторы объявили о новой методике вычисления расходов топлива турбоустановок ТЭЦ, не получив на самом деле сколько-нибудь достоверных результатов. Теоретические основания у этой «методики» отсутствуют, а ее глубокие, внутренние противоречия делают применение непредсказуемым. Попытки создать впечатление о том, что «методика» проверена экспериментами, пусть остаются без недоказуемых оценок.

Следует отметить отсутствие в обсуждаемой статье ссылок на типовые энергетические характеристики (ТЭХ) турбоагрегатов, которые дают практические методы решения поставленных в статье задач. В отличие от рассмотренных выше спекуляций, модели в ТЭХ были проверены в ходе натурных испытаний турбоагрегатов. Если публикация, как полагают авторы, представляет новый метод вычисления расходов топлива, то ее результаты следовало сравнить с теми, которые могут быть получены из ТЭХ и методических указаний по расчетам энергетических показателей. Поскольку это не было сделано, статью едва ли можно считать профессиональной в теплоэнергетике.

Ссылки на литературу

1. Кузеванов В.С., Султанов М.М. К вопросу об эффективности планирования режимов работы оборудования ТЭЦ // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. № 11 (5). С. 115 – 119.

2. Султанов М.М. Оптимизация режимов работы оборудования ТЭЦ по энергетической эффективности: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. МЭИ. 2010.