

**РАСЧЕТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ
И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ**

Рекуперативные теплообменники являются одним из самых распространенных классов теплотехнического оборудования и применяются в промышленной технологии, энергетике и на транспорте, среди них пластинчатые теплообменные аппараты (ПТА) занимают одну из лидирующих, по степени применения, позиций в виду целого ряда известных теплотехнических, массогабаритных и эксплуатационных свойств [1]. При выборе теплообменника в процессе его заказа осуществляется расчет потребной теплообменной поверхности по перечню заданных показателей, численные значения которых определяет заказчик. Крупными фирмами производителями ПТА, такими как α -Laval и другие, разработаны специальные расчетные программные продукты (в α -Laval – CAS-200), позволяющие по заданной номенклатуре показателей осуществить проектировочный расчет для заданного типа пластины – то есть определить потребную теплопередающую поверхность. При этом вводится поправка – *margine*, которая после получения расчетного значения теплопередающей поверхности увеличивает ее на величину, задаваемую расчетчиком. При этом имеются рекомендации по величине этой поправки [2], которая составляет 10 ... 20 % и более.

Таким образом, все неточности, связанные с расчетными соотношениями, теплогидравлическими и теплофизическими характеристиками и заданными исходными данными компенсируются этой поправкой. Кроме этого, подчеркнем, что расчет потребной теплообменной поверхности осуществляется, как правило, без учета загрязнений, то есть для чистой поверхности. При этом, как в отечественной нормативной документации [2], так и в зарубежных источниках [3] рекомендуется увеличивать расчетную поверхность с целью компенсации возрастающего, при загрязнении поверхности, термического сопротивления теплопередачи.

С другой стороны, традиционно успешность деятельности предприятий производящих теплообменники оценивается суммарной площадью установленной поверхности за определенный период времени. Таким образом, завышение расчетного значения теплообменной поверхности в определенной степени отражает заинтересованность производителя продать как можно больше своей продукции – теплопередающей поверхности, и применительно к ПТА-пластин.

Таким образом, объективно сложилось противоречие, заключающееся в том, что с одной стороны ПТА имеют ряд теплотехнических и эксплуатационных преимуществ и относятся к энергосберегающему высокоэффективному оборудованию, а с другой стороны – применяемые методы определения теплопередающей поверхности приводят к завышению площади поверхности, что приводит к потреблению дополнительных ресурсов (материалы, энергия) и завышению текущих эксплуатационных затрат, связанных с прокачиванием теплоносителя вдоль теплопередающей поверхности большей площади.

Поэтому, представляется очевидным, что действительная эффективность устанавливаемого ПТА определяется соотношением упомянутых двух аспектов. При этом, безусловно, повышение достоверности методов расчета повышает эффективность устанавливаемых ПТА, снижая капитальные и эксплуатационные затраты [1].

Сравнительная экономическая эффективность капитальных вложений определяется для сравнения взаимозаменяемых вариантов хозяйственных или технических решений при обязательном соблюдении *полной сопоставимости вариантов* по потребительскому эффекту (производственному результату для потребителей продукции). Такие расчеты имеют особое значение в энергетике, для которой характерны большая фондоемкость продукции, длительные сроки сооружения и использования производственных объектов, широкая взаимозаменяемость установок и энергоресурсов.

Экономические показатели капитальных вложений и ежегодных издержек производства взаимосвязаны. Можно, например, увеличив удельные капиталовложения, достигнуть снижения себестоимости единицы продукции. Так, на тепловых электростанциях при повышении начальных параметров пара удорожается оборудование, но вместе с тем снижаются расходы топлива. Наоборот, чрезмерное снижение капитальных вложений может привести к неоправданному повышению себестоимости продукции. Поэтому будет неверным производить выбор варианта, ориентируясь на минимум одного из этих показателей без учета их взаимного влияния. Соотношение между этими показателями по сравниваемым вариантам может быть различным.

Если по одному из двух сравниваемых вариантов (например, первому) меньше как капитальные затраты ($K_1 < K_2$), так и ежегодные расходы ($S_1 < S_2$), то этот вариант по сравнению с другими является *абсолютно эффективным*.

Однако если снижение себестоимости достигается при одновременном повышении капитальных вложений (в результате роста технической вооруженности, требующего дополнительных капитальных вложений), минимум себестоимости продукции данного предприятия еще не характеризует экономической эффективности. Может оказаться, что снижение себестоимости продукции на данном предприятии достигнуто ценой чрезмерно больших капиталовложений, использование которых на другом производственном объекте обеспечило бы еще большее снижение себестоимости.

Очевидно, что увеличение капиталовложений на ΔK может быть целесообразно в том случае, когда обеспечивается достаточная экономия на ежегодных издержках производства, т. е. когда удельная экономия ежегодных затрат на рубль дополнительных капиталовложений E не ниже определенной нормативной величины E_n . В соответствии с этим *условие выбора наилучшего из сравниваемых вариантов* может быть представлено в следующем виде [(руб/год)/руб.]:

$$\Delta S / \Delta K = (S_2 - S_1) / (K_1 - K_2) = E > E_n,$$

т.е. вариант с большими капиталовложениями (первый) будет лучшим в том случае, когда обеспечиваемая удельная экономия ежегодных затрат превышает нормативную. Показатель E , имеющий размерность 1/год, называется коэффициентом эффективности дополнительных капитальных вложений или, сокращенно, *коэффициентом эффективности*.

Сказанное иллюстрируют графики на рис. 1, характеризующие возможные соотношения экономических показателей для двух сравниваемых вариантов решения определенной производственной задачи, например передачи больших мощностей на дальние расстояния.

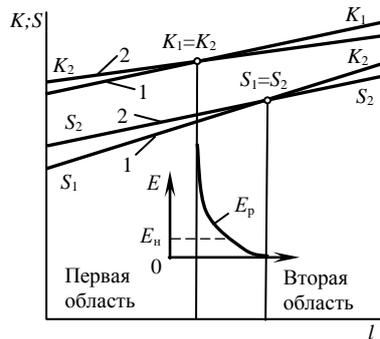


Рисунок 1 – К выбору оптимального варианта решения производственной задачи

Система электропередачи на постоянном токе по сравнению с системой на переменном токе характеризуется сравнительно большими затратами (капитальными и эксплуатационными) на подстанции и меньшими на 1 км линии. Соответственно с изменением длины линии l меняется соотношение суммарных капитальных K и эксплуатационных S затрат по сравниваемым вариантам электропередачи: на переменном токе 1 и постоянном токе 2. Пересечение характеристик издержек производства ($S_1 = S_2$) может в общем случае иметь место как левее вертикали $K_1 = K_2$, так и правее ее. Вертикали, отвечающие значениям $S_1 = S_2$ и $K_1 = K_2$, выделяют три области соотношений экономических показателей: в первой области более целесообразен вариант 1 (так как $K_1 < K_2$ и $S_1 < S_2$); в третьей области – вариант 2 ($K_2 < K_1$ и $S_2 < S_1$), а промежуточная вторая область – зона выбора оптимального варианта. В этой зоне $K_1 > K_2$, но $S_1 < S_2$, и значения расчетного коэффициента эффективности E_p меняются от нуля (при $S_1 = S_2$) до бесконечности (при $K_1 = K_2$).

При $E_p > E_n$ более целесообразен вариант с большими капитальными вложениями. Следовательно, левее вертикали, проходящей через точку $E_p = E_n$ лежит область значений расчетного параметра, при которых более целесообразен вариант 1, а правее – вариант 2.

Норматив сравнительной эффективности E_n характеризует минимальное отношение экономии текущих затрат к дополнительным капиталовложениям, ниже которого более капиталоемкий вариант невыгоден. Следовательно, низкий уровень норматива E_n стимулирует применение более капиталоемких вариантов. Чем шире возможность осуществления капиталовложений, тем ниже может быть норматив E_n . Таким образом, по мере интенсификации производства, роста производительности труда, ускорения технического прогресса и увеличения на этой основе фонда накопления нормативное значение E_n может снижаться. Вместе с тем, чем быстрее прогрессирует техника, тем выше норматив эффективности, тем большую экономию текущих затрат должны обеспечивать капиталовложения.

Проанализируем погрешности, вносимые различными компонентами при расчете площади теплопередающей поверхности. Как известно [4]

$$F_{Т.О.} = \frac{Q}{k \Delta t}, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, Вт; k – коэффициент теплопередачи $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$; Δt – температурный напор $^{\circ}\text{C}$.

Тепловой поток Q определяют по уравнению теплового баланса

$$Q = G \cdot C_p (t' - t''), \quad (2)$$

где G – расход теплоносителя $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; C_p – теплоемкость $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; t' и t'' – температуры теплоносителя на входе и выходе из ТА.

Следует подчеркнуть, что величина Q существенно зависит от характера процесса, в котором осуществляется перенос теплоты. Так, процессы с фазовым переходом характеризуются более высокими значениями как тепловых потоков, так и интенсивностью переноса. Учитывая разнообразие особенности процессов их можно разделить на три группы:

1. с низкой величиной Q – теплового потока $Q \leq 100$ Вт
2. со средней величиной $100 < Q \leq 1000$ Вт
3. с большими тепловыми потоками $Q > 1$ кВт.

Более информативно и корректно оценивать эти уровни по величине плотности теплового потока $q = \frac{Q}{F} = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$, однако, такие оценки корректны лишь для одинаковых по геометрической форме или подобных поверхностей. Таким образом, очевидно, что чем выше тепловой поток, тем жестче требования и точности его определения. Однако, для ряда тепловых процессов, например в металлургии [1], при охлаждении заготовок определение Q с точностью 15 ... 20 % является тем уровнем, улучшить который не представляется возможным.

Температурный напор определяется также в зависимости от характера процесса – с фазовыми переходами, или без. Как правило, для повышения точности расчетов F_T о. в процессах с фазовым переходом ее условно делят на две – где идет фазовый переход и где его не происходит. Однако в этом случае определенную трудность представляет определение места и условий окончания фазового перехода.

Кроме этого по величине температур процессы разделяют на обычные ($0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300^{\circ}\text{C}$), низкотемпературные ($-65^{\circ}\text{C} \leq t \leq 0^{\circ}\text{C}$), криогенные ($t < -65^{\circ}\text{C}$) и высокотемпературные ($t > 300^{\circ}\text{C}$).

Не анализируя особенности низкотемпературных и криогенных процессов, подчеркнем, что если в диапазоне температур от 0°C до 300°C точность ее определения можно оценить в $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, то при более высоких температурах оценка точности представляет отдельную задачу.

Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3)$$

связан с температурными параметрами процесса, поскольку определяемые по критериальному уравнению $\alpha_1 \alpha_2$

$$\alpha = \frac{\lambda}{l} \cdot C \operatorname{Re}^m \cdot \operatorname{Pr}^n = \frac{\lambda}{l} \cdot C \frac{w^m l^m}{v^m} \cdot \frac{v^n}{a^n} = \lambda \cdot C \frac{w^m l^{m-1} \cdot v^{n-m}}{a^n}. \quad (4)$$

В этом уравнении λ , a , v определяются по определяющей температуре, таким образом, точность определения температур на входе и выходе в ТА определяют точность определения средних значений теплофизических характеристик теплоносителей. Заметим, что термическое сопротивление теплопроводности стенки $\left(\frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}\right)$ – определяется точно, если задан материал теплообменной поверхности и ее конструктивные размеры.

Ряд недавних исследований [5, 6, 7] показал, что по крайней мере для гофрированных поверхностей показатель степени числа Прандтля, сам является функцией этого числа, то есть

$$n = f(\operatorname{Pr}).$$

Результаты исследований полученных соотношений показали, что они дают лучшие, в смысле точности, результаты, чем рекомендуемое значение $n = 0,33$.

Таким образом, можно заключить, что теплотехнические расчеты уже содержат погрешность в определении $F_{\text{т.о.}}$ 10 ... 20 % и более. Дальнейшее увеличение поверхности (margin) необоснованно ее завышает. Поэтому реконструкция теплообменных аппаратов путем их замены, должна проводиться только по результатам полного технико-экономического анализа. При этом увеличение «длины» теплообменника должно сопровождаться анализом эксплуатационных расходов, поскольку гидравлическое сопротивление трению $\Delta P = f\left(\frac{l}{d}; W\right)$, определяет затраты мощности на прокачивание теплоносителя.

В результате можно сделать следующие выводы

1. Мероприятия по реконструкции теплообменного оборудования должны в обязательном порядке подвергаться анализу с точки зрения оценки эффективности возможных вариантов.
2. Для недопущения повышения степени использования природных ресурсов необходимо производить оценки точности задаваемых при расчете потребной теплообменной поверхности величин и только на основе результатов этого анализа назначать margin.
3. Эксплуатационные расходы при установке нового оборудования не должны превышать имеющиеся, особенно по величине мощности на прокачивание теплоносителей.

Литература

1. Товажнянский Л.Л., Анипко О.Б., Капустенко П.А. и др. Основы энерготехнологии промышленности. Харьков; НТУ «ХПИ» 2002. – 436 с.
2. Теплообменники пластинчатые. Нормативный метод расчета. Харьков, УКРНИИХИММАШ, 1984, 128 с.
3. Standards of Tubular Exchanger Manufactures Association, 4th ed, 1974.

4. Kreith F., Principles of Heat transfer, 3rd. ed, Lutext Publishers Group, N. Y., 1973.
5. Анипко О.Б., Горбунов К.А. О влиянии критерия Прандтля на теплопередачу // Интегрированные технологии и энергосбережение. № 4, 2011.
6. Анипко О.Б., Арсеньева О.П. Надежность пластинчатых теплообменных аппаратов систем отопления и горячего водоснабжения с учетом образования загрязнений на теплопередающей поверхности // Интегрированные технологии и энергосбережение. № 4, 2003, с. 9–13.
7. Sushant Kumar, Bolkrisha Mehta, Sameer Khandekar. Effect of Prandtl number on internal convective heat transfer in laminar single-phase pulsating flows. Электронный ресурс. Режим доступа home.litk.ac.in/~samkhan/bio_data/publikations.

Bibliography (transliterated)

1. Tovazhnyanskyu L.L., Anipko O.B., Kapustenko P.A. i dr. Osnovy energeticheskoy promyshlennosti. Harkov; NTU «HPI» 2002. – 436 p.
2. Teploobmenniki plastinchatyie. Normativnyiy metod rascheta. Harkov, UKR-НИИММШ, 1984, 128 p.
3. Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association, 4th ed, 1974.
4. Kreith F., Principles of Heat transfer, 3rd. ed, Lutext Publishers Group, N. Y., 1973.
5. Anipko O.B., Gorbunov K.A. O vliyaniy kriteriya Prandtlya na teploperedachu. Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie. # 4.– 2011.– P. 94–98.
6. Anipko O.B., Arseneva O.P. Nadezhnost plastinchatyih teploobmennyih apparatov sistem otopeniya i goryachego vodosnabzheniya s uchetom obrazovaniya zagryazneniy na teploperedayuschey poverhnosti. Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie. # 4, 2003, P. 9–13.
7. Sushant Kumar, Bolkrisha Mehta, Sameer Khandekar. Effect of Prandtl number on internal convective heat transfer in laminar single-phase pulsating flows. Elektronnyiy resurs. Rezhim dostupa home.litk.ac.in/~samkhan/bio_data/publikations.

УДК 536.2

Бабич М.І.

**РОЗРАХУНКОВІ ПОКАЗНИКИ ПЛАСТИНЧАТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ
ТА ДЕЯКІ АСПЕКТИ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНИХ
РЕСУРСІВ**

Наведено дані аналізу щодо завищення розміру теплообмінної поверхні відносно розрахункового значення. Показано, що збільшення поверхні призводить не тільки до збільшення експлуатаційних витрат, але й до підвищення інтенсивності вичерпування природних ресурсів.

Babich M.I.

**CALCULATION OF THIS INDICATOR PLATE HEAT EXCHANGERS
AND SOME ASPECTS OF NATURAL RESOURCE MANAGEMENT**

Data analysis for overstating the size of the heat exchange surface relative to the calculated value. It is shown that increasing the surface not only leads to an increase in operating costs, but also to increase the intensity of depletion of natural resources.