

Исследование теплопроводности внешних загрязнителей теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения

В.Б. Кунтыш, А.Б. Сухоцкий, С.О. Филатов, А.Ю. Жданович
(Белорусский государственный технологический университет)

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) широко применяются в химической промышленности при производстве метанола, этанола, капролактама, полипропилена, ацетальдегида; в нефтеперерабатывающей промышленности для конденсации и охлаждения продуктов ректификации нефти (бензин, керосин, дизельное топливо, мазут); в пищевой промышленности при охлаждении растительных масел. Относительно новая область применения АВО – это охлаждение природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Системы транспорта газа на расстояния до нескольких тысяч километров в первой половине XXI века будут динамично развиваться с учетом огромных разведанных запасов газа и обоснованных перспектив открытия новых месторождений. Это вызовет последующее интенсивное развитие оборудования для охлаждения компримированного газа и в первую очередь АВО. Потребителями АВО также являются тепло- и электроэнергетика, ядерная энергетика, железнодорожный транспорт, холодильная техника, системы утилизации низкопотенциальной теплоты. По нашим оценкам, в России и странах ближнего зарубежья находится в эксплуатации не менее 52 000 АВО в пересчете на аппарат с фронтальным сечением 4×4 м и мощностью привода 37 кВт. Эксплуатация АВО требует ощутимого потребления электрической энергии на привод вентиляторов, а на изготовление аппаратов расходуется сотни тысяч тонн металла, в том числе дорогостоящего алюминия и его сплавов для оребрения теплообменных труб. Таким образом, ресурсо- и энергосбережение применительно к АВО является актуальной задачей, и одним из направлений ее решения является научно обоснованное значение коэффициента запаса площади поверхности теплообмена (теплопередачи)

$$k_{\text{зап}} = F_{\text{уст}}/F_{\text{р}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{уст}}$, $F_{\text{р}}$ – соответственно установленная и расчетная площадь поверхности теплообмена.

В соответствии с уравнением теплопередачи расчетная площадь поверхности АВО

$$F_{\text{р}} = Q/(k\Delta t_{\text{ср}}), \quad (2)$$

где Q – тепловой поток аппарата; k – коэффициент теплопередачи; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средний температурный напор.

При проектировании АВО заданными исходными данными являются тепловой поток Q и температуры охлаждаемого продукта и воздуха, которые однозначно определяют значение температурного напора $\Delta t_{\text{ср}}$. Следовательно, при тепловом расчете

$$Q = \text{const} \text{ и } \Delta t_{\text{ср}} = \text{const}$$

и ими нельзя манипулировать.

Из уравнения (2) видно, что при постоянстве Q и $\Delta t_{\text{ср}}$ значение $F_{\text{р}}$ зависит исключительно от достоверности расчета коэффициента теплопередачи аппарата.

При эксплуатации АВО происходит снижение его тепловой мощности в результате многих причин: загрязнения внутренней и наружной поверхности труб теплообменных секций; повреждения оребрения; отглушения части труб из-за появления гидравлической неплотности; неоднородности поля скорости охлаждающего воздуха, набегавшего на трубный пучок секций и др.

Действительная тепловая мощность АВО может оказаться недостаточной из-за неудачного выбора методики расчета коэффициента теплопередачи или принятия неадекватных значений термического сопротивления загрязнений. В связи с тем, что действительный коэффициент теплопередачи $k_{\text{д}}$ по той или иной причине оказывается меньше k , для обеспечения необходимой тепловой мощности АВО приходится устанавливать большую площадь поверхности теплообмена $F_{\text{уст}}$. Так как

$$Q = k_{\text{д}}\Delta t_{\text{ср}}F_{\text{уст}}, \quad (3)$$

формулу (1) для коэффициента запаса площади можно представить в виде

$$k_{\text{зап}} = k/k_{\text{д}}. \quad (4)$$

Возникает естественный вопрос: какое значение $k_{\text{зап}}$ следует считать достаточным, чтобы обеспечить основное функциональное назначение АВО, заключающееся в гарантированном отводе заданного теплового потока на протяжении всего периода эксплуатации до выработки ресурса надежности? При расчете проектного значения k для «идеального» случая, когда учтено влияние указанных дополнительных факторов на интенсивность теплопередачи и допущена возможность равенства $k = k_{\text{д}}$ нельзя назначать $k_{\text{зап}} = 1,0$. Нормами теплового и гидравлического расчета [1] разрешается заглушать по продукту 4 трубы из 100. Поэтому минимальное значение $k_{\text{зап}}^{\text{мин}} = 1,04$, следовательно, $F_{\text{уст}}^{\text{мин}} > 1,04F_{\text{р}}$.

А как быть с верхним значением $k_{\text{зап}}$? Анализ научно-технических источников указывает на полную противоречивость рекомендаций и проектных решений. Предусмотренный нормами проектирования 10%-ный запас площади поверхности теплообмена оказался недостаточным [2] и для АВО компрессорных станций магистральных газопроводов его рекомендуется увеличить до 30%. В работе [3] этот запас рекомендуют повысить до 25%,

а в работе [4] – назначать запас поверхности теплообмена равным 15%. Разброс значений коэффициента запаса площади свидетельствует, во-первых, об отсутствии всестороннего изучения этой задачи, во-вторых, о том, что рекомендации не опираются на единообразные методы расчета коэффициента теплопередачи АВО. По своей сущности $k_{зап}$ отражает «незнание проблемы».

Подходы к расчету коэффициента теплопередачи диаметрально противоположные. По мнению авторов работы [5] влияние загрязнения с воздушной стороны можно не учитывать, так как коэффициент теплоотдачи от оребрения к охлаждающему воздуху низок, и поэтому термическое сопротивление с внешней стороны является определяющим в общем термическом сопротивлении теплопередачи. Подобная концепция прослеживается в методиках ВНИИнефтемаш [6], расчетные формулы по теплопередаче которых вообще не включают термическое сопротивление загрязнения оребрения. Однако экспериментальные исследования [7, 8] теплопередачи натуральных АВО типа 2АВГ-75, а также АВО фирмы HadSon из биметаллических ребристых труб с накатанными алюминиевыми ребрами указывают на уменьшение коэффициента теплопередачи до 12% из-за внешнего загрязнения оребрения. Следовательно, методика расчета коэффициента теплопередачи должна включать термическое сопротивление загрязнения оребрения, что удовлетворяется формулой АЛТИ [3],

$$k_p = \left[\frac{1}{\alpha_1} \frac{\varphi d_0}{d_1} + \frac{\varphi d_0}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_k}{d_1} + R_{31} \frac{\varphi d_0}{d_1} + R_k \frac{\varphi d_0}{d_k} + \frac{\varphi d_0}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_0}{d_k} + \frac{1}{\alpha} + R_{32} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности несущей трубы; φ – коэффициент оребрения трубы; d_0 – диаметр алюминиевой оболочки (рис. 1); d_1 – внутренний диаметр несущей трубы; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала несущей (стальной) трубы; d_k – диаметр ребра по основанию; R_{31} – термическое сопротивление загрязнения с внутренней стороны трубы; R_k – контактное термическое сопротивление биметаллической трубы; λ_a – коэффициент теплопроводности материала алюминиевой оболочки; α – приведенный коэффициенты теплоотдачи от оребренной поверхности трубы к воздуху, вычисленный по полной площади поверхности оребрения; R_{32} – термическое сопротивление загрязнения поверхности оребрения (внешнее).

Диаметр ребра по основанию d_k совпадает с диаметром контактирования внутренней поверхности алюминиевой ребристой оболочки с наружной поверхностью несущей трубы d_H , а толщина алюминиевой оболочки равна $0,5(d_0 - d_H)$.

В соответствии с формулой (2) коэффициент теплопередачи вычисляется по площади поверхности оребрения трубы (теплообменной секции) F_p с учетом влияния загрязнений с обеих сторон трубы. Коэффициент оребрения биметаллической ребристой трубы (БРТ) (см. рис. 1) с круглыми спиральными ребрами и учетом площади поверхности торцов ребер имеет вид

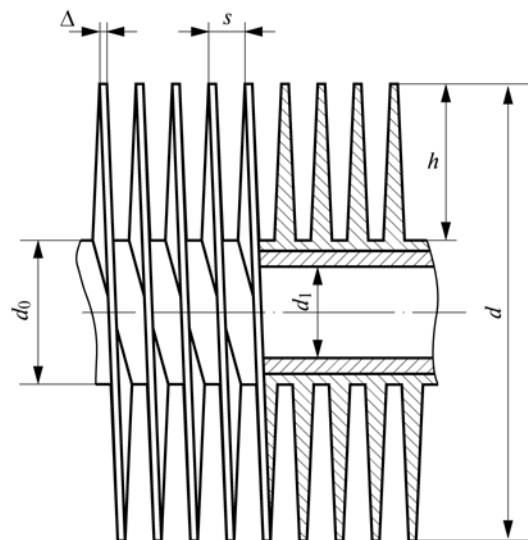


Рис. 1. Биметаллическая ребристая труба

$$\varphi = 1 + \frac{2h}{sd_0} (d_0 + h + \Delta), \quad (6)$$

где h , s , Δ – соответственно высота, шаг и средняя толщина ребра.

В справочной литературе [1, 5, 6] имеется достаточно большое количество проверенных практикой данных по величине термического сопротивления движущихся внутри трубы различных охлаждаемых технологических продуктов и энергоносителей. Аналогичная картина характерна и для контактного термосопротивления (КТС) [1, 4]. Однако возникает неопределенность при вычислении значения $R_{31} = d_3/\lambda_3$ с внешней стороны БРТ в связи с отсутствием достоверных значений коэффициента теплопроводности λ_3 загрязнителей даже при наличии рекомендаций по назначению толщины слоя загрязнения d_3 . Структура загрязнителей на поверхности оребрения полидисперсна и зависит от географической местности и условий эксплуатации АВО. Возможны загрязнения в виде заноса сухой землей, песком, гравием, смесью сухих листьев и травы, иглами сосновых и хвойных деревьев, цветочной пылью и т.п. [7, 8]. Но в большинстве случаев загрязнение представляет собой различное сочетание отдельных чистых компонентов.

Изложенное определило цель и объем предлагаемой работы – изучение теплопроводности основных типов загрязнителей оребрения АВО и различных их массовых сочетаний.

Для опытного определения коэффициента теплопроводности внешних загрязнителей применена установка (рис. 2), реализующая метод пластины [9, 10] при стационарном тепловом режиме. Она включает массивный текстолитовый диск 5, который соединен с нижерасположенным текстолитовым кольцом, в котором размещен электронагреватель 4, залитый теплопроводным металлом, что создает равномерное температурное поле. Между нагревателем и водяным холодильником 1 находится теплоизолированное кольцо 3, которое заполняется исследуемым загрязнителем 2 (сыпучая засыпка).

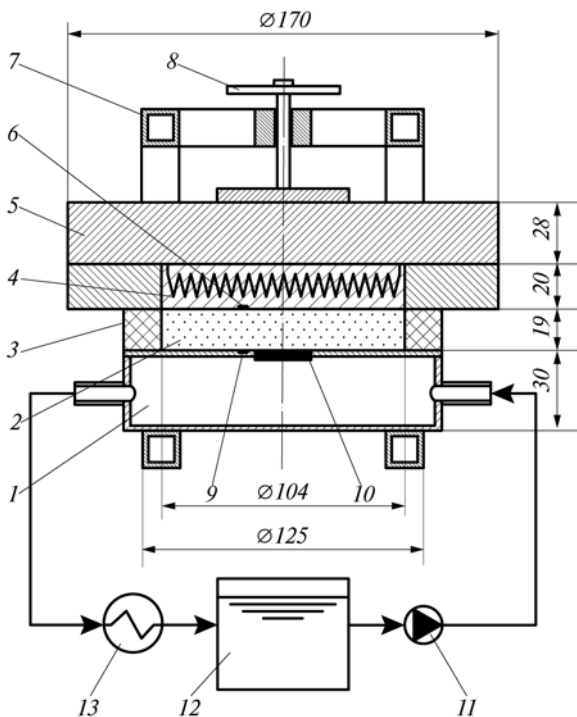


Рис. 2. Схема опытной установки

Тепловой поток, прошедший через засыпку, отводится водой, которая далее поступает в воздушный трубчаторебристый теплообменник 13, пройдя который, охлаждается принудительным потоком окружающего воздуха, перемещаемого через межтрубное пространство осевым вентилятором. Осевой вентилятор имеет автоматическое регулирование по схеме включен–выключен для поддержания постоянной температуры воды на выходе, которая далее направляется в бак 12, а из него насосом 11 подается в холодильник 1.

При проведении опытов производительность насоса составляла 0,16 л/с (регулировалась вентилем на линии подачи). Вращением маховика 8 опорной рамы 7 можно было создавать различное уплотнение, в первую очередь сухих засыпок (листья, трава, иголки и их смеси).

Тепловой поток электронагревателя ступенчато регулировался. Для измерения температуры поверхности исследуемой засыпки использованы датчики 6, 9, которые установлены на наружной поверхности нагревателя и холодильника, а плотность теплового потока, прошедшего через засыпку, измерялась по данным датчика 10, установленного в середине заподлицо с наружной поверхностью холодильника. Погрешность измерения температур $\pm 0,25^\circ\text{C}$, а плотности теплового потока $\pm 1 \text{ Вт/м}^2$. Коэффициент теплопроводности загрязнителя λ вычисляется по формуле

$$\lambda = q\delta/\Delta t \quad (7)$$

где δ – толщина засыпки; Δt – перепад температуры на засыпке.

Толщина засыпки поддерживалась постоянной $\delta = 19 \text{ мм}$.

Относительная погрешность определения коэффициента теплопроводности не превысила $\pm 8\%$.

Тестирование опытной установки на предмет ее работоспособности для получения достоверных заключений о теплопроводности загрязнителей разной структуры осуществлялось посредством эталонного прибора HFM 436 Lambda, который лицензирован Госстандартом Беларуси и реализует метод плоского слоя в соответствии со стандартом Беларуси СТБ1618–2006. В качестве тестового материала использован сухой гравий – смесь камней максимальным размером $11 \times 12 \times 4,1 \text{ мм}$ и минимальным $1,0 \times 1,1 \times 0,9 \text{ мм}$ с мелким однородным песком. Массовая доля камней в общей массе гравия составляла 38%, средняя плотность гравия $\rho = 1725 \text{ кг/м}^3$. Средняя температура при испытании $t = 31,2^\circ\text{C}$. По нашим опытам получено $\lambda = 0,411 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а на эталонном приборе $\lambda_0 = 0,393 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ с погрешностью не более 3%. Расхождение значений λ гравия составляет 4,5% и находится в интервале погрешности опытной установки.

Достоверность получаемых значений λ значительно зависит от измерения их по достижении установившегося теплового режима, что видно из рис. 3, на котором приведена кривая изменения коэффициента теплопроводности супеси (плодородный слой земли) влажностью 10,8% в зависимости от продолжительности подвода теплового потока (время нагрева). Также дана динамика изменения температурного перепада Δt за этот период времени. Стационарный тепловой режим наступает через 38 мин, при котором $\lambda = 0,675 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ достигает своего истинного значения. Измерение λ вне диапазона стационарного режима вызывает увеличение коэффициента теплопроводности до 1,16 раза.

Результаты исследования разных загрязнителей приведены в таблице. Влажность загрязнителя 1 составляла 4,3%. Трава в смеси с листьями была мелкой, длиной не более 3 см. Загрязнитель 4 получен в результате смешения равных долей сухой земли и мелкого песка (номер 1, 2). Для загрязнителей 7–11 дана массовая доля листьев и травы в общей массе смеси. Для этих же загрязнителей плотность и коэффициент λ в числителе, а в знаменателе – насыпному.

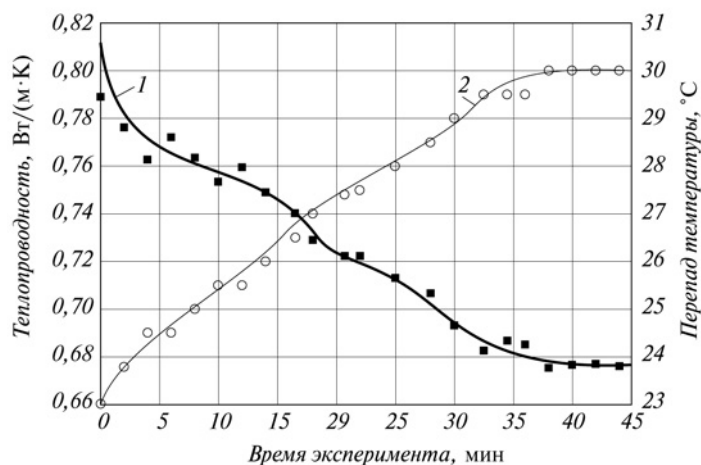


Рис. 3. Динамика изменения опытных значений коэффициента теплопроводности λ (1) и перепада температур Δt (2)

Характеристика некоторых загрязнителей АВО

Номер образца	Описание образца	Плотность, кг/м ³	Массовое содержание травы с листьями, %	Температура, °С	λ , Вт/(м·К)
1	Земля сухая «супесь»	1555	–	34,3	0,293
2	Песок сухой мелкий	1498	–	31,0	0,363
3	Песок кварцевый	1599	–	31,5	0,320
4	Сухая смесь песка и земли	1493	50	30,3	0,315
5	Смесь сухих листьев и травы	238	–	32,0	0,055
6	Сухие иголки сосновые	199	–	34,0	0,072
7	Сухая смесь земли с листьями и травой	1100/990	4,2	34,8	0,259/0,239*
8	То же	959/861*	8,3	35,5	0,202/0,174*
9	–”–	785/714*	12,1	37,3	0,170/0,143*
10	–”–	788/676*	39,1	39,1	0,155/0,123*
11	–”–	665/581*	36,3	36,3	0,136/0,118*

*В числителе – для плотного слоя, в знаменателе – для насыпного.

ответствуют насыпному слою. Увеличение плотности смеси вызывает рост коэффициента теплопроводности до 20% (рис. 4). Видно также, что рост массы сухих листьев и травы в смеси сопровождается монотонным ухудшением теплопроводности. Так, при изменении от 4,2 до 18,9% (увеличение в 4,5 раза) коэффициент теплопроводности уменьшается в 2 раза. Даже небольшая примесь сухих листьев с травой в земле (до 4,2 %) ухудшает теплопроводность на 50%.

Таким образом, измеренные значения коэффициента теплопроводности позволяют осуществлять диф-

ференцированный расчет термического сопротивления загрязнения секций АВО по внешней стороне с учетом географической местности эксплуатации и обоснованно назначать верхнее значение коэффициента запаса площади поверхности теплообмена. Итоговым результатом является энерго- и ресурсосбережение.

Список литературы

1. *Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения*. Справочник/Под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996.
2. *Карпов С. В., Тункель Г. Е., Максимов И.И.* АВО газа: эффективность использования//Газовая промышленность. 1989. №4.
3. *Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М.* Тепловой и аэродинамический расчеты ребренных теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат, 1992.
4. *Шмеркович В.М.* Применение аппаратов воздушного охлаждения при проектировании нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1971.
5. *Керн Д., Краус А.* Развитие поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977.
6. *Методика теплового и аэродинамического расчета аппарата воздушного охлаждения газа*. М.: ВНИИнефтемаш, 1971, 1982.
7. *Камалетдинов И.М.* Энергосбережение при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2002.
8. *Беркутов Р.А.* Повышение энергоэффективности систем охлаждения газа на компрессорных станциях. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2010.
9. *Осипова В.А.* Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.: Энергия, 1969.
10. *Попов В.М.* Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971.

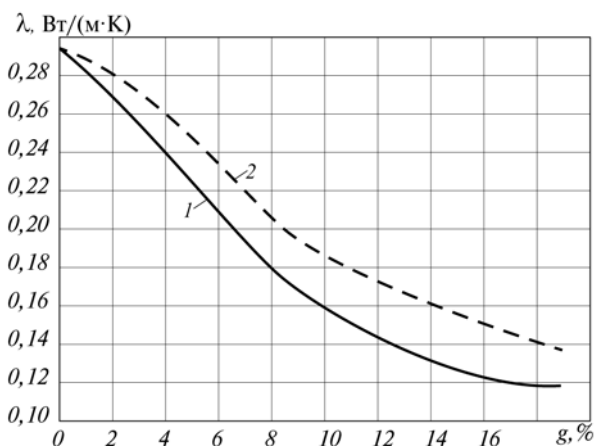


Рис. 4. Влияние массового содержания травы с листьями в земле g на теплопроводность λ в загрязнителях 7–11: 1 – насыпной слой; 2 – плотный слой