

Анипко О.Б., Новиков А.И., Савченко В.А.

**ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ
И СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ЗАГРЯЗНЕНИЯМИ ТЕПЛООБМЕННОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА**

АО «Содружество–Т», Украинский морской институт

Актуальность работы. Одной из основных причин снижения интенсивности теплообмена является отложение на теплопередающей поверхности теплообменника различного рода загрязнений, которые оказывают дополнительное сопротивление теплопередаче.

К какой бы конструкции не относился теплообменный аппарат, он обладает вполне определёнными статическими характеристиками, которые с достаточной степенью точности рассчитываются на основе хорошо разработанных и многократно апробированных методов теории теплопередачи.

Существует подход, в соответствии с которым большинство типов энергетических, технологических и транспортных ТА характеризуются относительно медленным протеканием процесса теплообмена, работают в мало изменяющихся условиях, практически при постоянных нагрузках. Поэтому для таких аппаратов не возникает проблема динамики. Однако, если под динамикой процесса понимать изменение во времени выходных параметров под влиянием каких-либо факторов, то перечисленные группы ТА следует отнести к динамическим объектам, а одним из существенных факторов, влияющим на его тепло-гидравлические характеристики – изменяющееся во времени термическое сопротивление слоя отложений на теплопередающей поверхности. Причём, влияние этого фактора может быть настолько существенным, что сводит «на нет» преимущества самых высокоэффективных теплообменников.

При выборе ТА оценка термического сопротивления возможных загрязнений имеет существенное значение, поскольку именно термическое сопротивление теплопередачи определяет эффективность теплообменного аппарата. Существует практика [1, 7, 13], когда с целью компенсации термического сопротивления возникающих загрязнений расчётную поверхность увеличивают на 10...15 %, а иногда и до 50 %. Это влечёт за собой выпуск дополнительной поверхности теплообмена, материалом которой, как правило, являются алюминий, медь, легированные стали. Кроме того, увеличение поверхности неизбежно ведёт к росту мощности на прокачивание теплоносителей, стоимости теплообменников, что отражается на себестоимости выпускаемой продукции и увеличению сроков окупаемости нового теплообменного оборудования.

Обзор и анализ ряда работ показывает, что к основным последствиям, к которым приводят отложения, следует отнести:

1. Изменение коэффициента теплопередачи K .
2. Изменение площади проходного сечения для потока теплоносителя.
3. Изменение геометрической формы каналов ввиду неравномерности отложений по длине и периметру.
4. Изменение шероховатости поверхности.
5. Изменение гидравлического сопротивления (как следствие п. 2, 3, 4).

Следует отметить, что в общем случае толщина загрязнений ($\delta_{загр}$) и теплопроводность ($\lambda_{загр}$) меняются со временем. В большинстве работ приводятся данные о термическом сопротивлении теплопередаче различных отложений без указания на то, через какое время работы ТА получены эти значения, хотя именно время достижения предельного допустимого значения термического сопротивления загрязнений и определяет периодичность обслуживания.

Таким образом, в общем случае полагая, что $\lambda_{загр} = \text{const}$ можно записать

$$\mathfrak{R}_{загр} = f(\bar{\tau}) = \frac{\delta_{загр}(\bar{\tau})}{\lambda}. \quad (1)$$

Учитывая это, коэффициент теплопередачи K также является функцией времени:

$$K(\bar{\tau}) = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \left(\frac{\delta_{загр}(\bar{\tau})}{\lambda_{загр}}\right)_1 + \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\lambda_2} + \left(\frac{\delta_{загр}(\bar{\tau})}{\lambda_{загр}}\right)_2} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\lambda_2} + \mathfrak{R}_{загр}^{\Sigma}(\bar{\tau})}, \quad (2)$$

где индексы 1 и 2 относятся к греющему и нагреваемому теплоносителю соответственно, а $\mathfrak{R}_{загр}^{\Sigma}(\bar{\tau})$ – суммарное термическое сопротивление загрязнений с обеих сторон теплопередающей поверхности.

Строго говоря, в выражении (2) только термическое сопротивление степени $\left(\frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}}\right)$ будет оставаться постоянным, поскольку коэффициенты теплоотдачи α_1 α_2 также будут изменяться в виду последствий отложений, указанных в пунктах 2, 3, и 4. Однако, в доступных источниках и обзорных работах данные о величине изменения коэффициента теплоотдачи в результате уменьшения проходного сечения канала, изменения его формы и шероховатости стенок не приводится.

Можно предположить, что при отсутствии ограничений на мощность, затрачиваемую на прокачивание теплоносителя, увеличение скорости потока может приводить к повышению α , что может частично компенсировать снижение K из-за термического сопротивления отложений.

Следует отметить, что повышение скорости теплоносителя ограничивается вибрацией, шумом и мощностью, затрачиваемой на прокачивание теплоносителя. Если предположить, что расход теплоносителя остаётся неизменным ($G = \text{const}$) и при условии, что проходное сечение (S) уменьшается в процессе эксплуатации, то скорость потока должна возрасти. Дальнейшее повышение скорости связано с дополнительной мощностью на прокачивание теплоносителя, что не всегда оправдано.

Таким образом, в работающем ТА

$$G = S(\bar{\tau}) \cdot W(\bar{\tau}). \quad (3)$$

Во многих публикациях приводятся впечатляющие фотографии отложений на поверхностях [1–6]. Обобщённый процесс изменения геометрической формы гофрированного канала может быть представлена следующим образом (рис. 1).

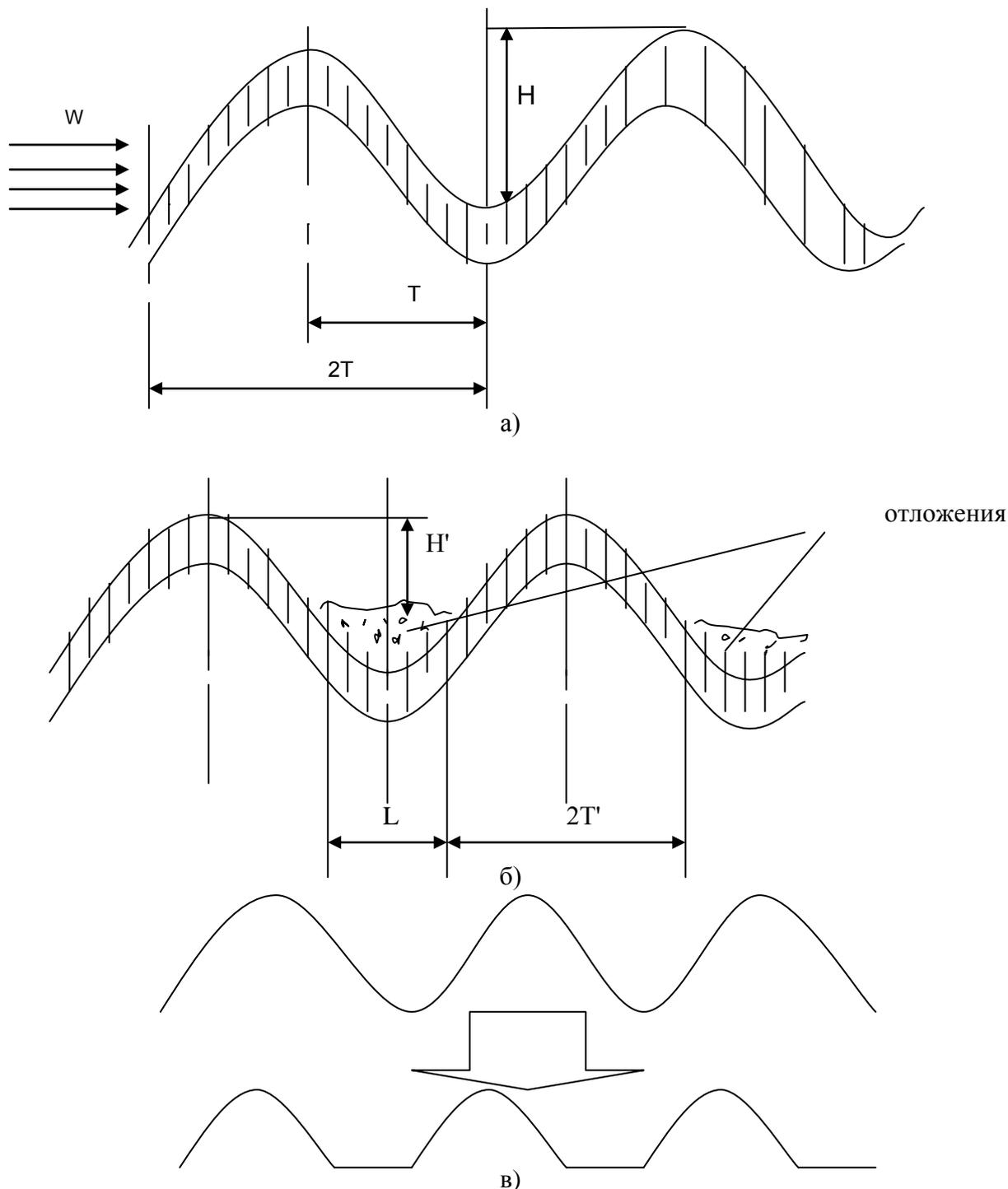


Рисунок 1

а) – чистая гофрированная поверхность; б) та же поверхность с отложениями; в) схема трансформации геометрической формы поверхности в результате образования отложений

Чистая поверхность (рис. 1а) характеризуется высотой гофра H и их шагом $2T$. В процессе эксплуатации впадины в большей степени подвержены образованию отложений, что обусловлено структурой потока вдоль гофрированной поверхности. Вершины выступов, где имеет место отрыв потока, длительное время остаются в меньшей степени загрязнёнными. Наконец заполнение впадин становится настолько существенным, что между гофрами образуется довольно протяжённая площадка длиной L (рис. 1.б) таким образом, поверхность, по своему профилю из гофрированной становится плоским каналом с выступами. Такая новая поверхность характеризуется другими геометрическими параметрами: L – расстояние между выступами; H' и $2T'$ – соответственно высота и длина выступов. Анализ доступных данных о теплопередаче таких поверхностей показывает [3], что при $Re = (3/10) \cdot 10^4$ теплоотдача гофрированной поверхности пропорциональна $Re^{0.5}$, а поверхности с выступами – $Re^{0.8}$ [2]. Причём существенно неравномерными вдоль поверхности становятся значения местного коэффициента теплоотдачи и, как следствие, возрастают перетоки теплоты в гофрированной стенке. Кроме этого шероховатость участков с отложениями отличается от шероховатости незагрязнённой поверхности.

Шероховатость определяет коэффициент сопротивления. Если она меняется в процессе работы ТА, то, в конечном счёте, меняется и потребная мощность на прокачивание теплоносителя, что приводит к отклонению значения фактической скорости теплоносителя в ТА от расчётного.

Таким образом, отклонения приводят к ряду последствий, которые в совокупности изменяют теплогидравлические характеристики работающего ТА. Ряд факторов, таких как изменение шероховатости поверхности, геометрической формы, влияние изменения скорости представляются малоизученными в ходе эксплуатации. В основном влияние загрязнений учитывают в виде дополнительного термического сопротивления, значение которого постоянно и выбирается на основе нормативных рекомендаций, которые носят отрывочный, селективный характер, часто в виде прогноза [4], а в отдельных случаях носят противоречивый характер.

В настоящее время в промышленности, энергетике и на транспорте применяется большое количество типов рекуперативных ТА с различными теплоносителями. Поэтому целесообразно разработать классификацию ТА, отражающую специфические условия образования загрязнений (рис. 2).

Проблема отложений на теплопередающих поверхностях рекуперативных теплообменников не нова. Наряду с периодическими очистками различными исследователями предлагалось увеличивать скорость теплоносителя, увеличивать расчётную поверхность [1], вводить добавки в теплоноситель, резко менять температурный режим. Однако, до настоящего времени универсального предотвращения образования отложений не разработано. По-видимому, он и не может быть разработан в виду ряда объективных причин, к которым следует отнести:

- невозможность использования «чистого» теплоносителя, т.е. не содержащего примесей, образующих отложения;
- изменение температуры поверхности ТА, а именно, её нагрев, что увеличивает химическую активность конструкционных материалов;
- микро- и макро- электромагнитные процессы в пограничном слое теплоносителя и тонком поверхностном слое теплообменной поверхности.

Таким образом, перечисленные способы «предотвращения» загрязнений, в лучшем случае, являются решениями частных задач для конкретных условий. Так, увеличение скорости теплоносителя ведёт к росту гидравлического сопротивления, а, следовательно, и мощности на прокачивание теплоносителя.

Увеличение поверхности для компенсации возрастающего термического сопротивления также нельзя признать вполне оправданным, поскольку, во-первых – дополнительная поверхность также загрязняется; во-вторых – увеличивается стоимость ТА, и, наконец, в-третьих – увеличивается гидравлическое сопротивление.

К теплоносителям, применяемым в энергетических, транспортных, технологических ТА, предъявляется ряд требований по их теплофизическим, химическим и эксплуатационным свойствам [5]. Так, теплоносители, имеющие большие плотность и теплоёмкость, позволяют отводить теплоту при сравнительно небольших перепадах температуры между входом и выходом в ТА при одинаковых объёмных расходах теплоносителя. В тоже время повышенная плотность приводит к необходимости затрачивать большую мощность на привод насосов, при прочих равных условиях. Высокая теплопроводность теплоносителя положительно сказывается на теплоотдачу, поскольку снижает термическое сопротивление в пограничном слое.

Важной характеристикой является температура кипения теплоносителя. Следует стремиться к тому, чтобы теплоноситель имел сравнительно высокую температуру кипения при невысоком давлении насыщающих паров. Такое соотношение позволяет создавать ТА, в которых теплоноситель остаётся в жидком состоянии без повышения давления. В свою очередь низкое давление позволяет уменьшать массу конструкции и использовать обычные материалы без риска разрушения теплообменника.

С точки зрения выбора материала ТА другим важнейшим фактором являются химические свойства теплоносителя. Необходимо, чтобы теплоноситель был химически стойким, не способствовал коррозии и эрозии материала, не образовывал взрывчатые смеси, как например, жидкие щелочные металлы с водой. Алюминий с водой также даёт экзотермическую реакцию при определённых температурах. Перечисленные факторы существенно влияют также и на свойства и структуру отложений.

Так, повышение температуры приводит к спеканию отложений в пристенном слое. Различные примеси в теплоносителе, вступая в реакцию между собой и с материалом ТА могут увеличивать количество отложений и интенсивность их образования. Эрозия повышает шероховатость поверхности, создавая благоприятные условия для сцепления отложений с поверхностью.

Таким образом, свойства теплоносителя существенно влияют на интенсивность отложений на теплообменной поверхности. Так для судовых теплообменников наиболее проблематичным теплоносителем является морская вода, солёность которой колеблется в пределах от 6–8 до 40 % и в которой содержатся биологические компоненты.

Отложения образуются при работе теплообменников на различных теплоносителях, с любой стороны, как на гладких, так и на развитых поверхностях. Так на наружных поверхностях теплообменников транспортных машин наблюдается отложение пыли, масел, продуктов сгорания топлива [10]. Теплообменники-испарители холодильных установок со стороны воздуха характеризуются инееобразованием, что также снижает коэффициент теплопередачи.

Однако, несмотря на разнообразие условий работы ТА и теплоносителей, большинство исследователей сходно оценивают структуру слоя отложений. Он подразделяется на три характерных слоя – верхний, средний и нижний. Верхний слой состоит из частиц слабо связанных между собой. В среднем слое идёт процесс кристаллизации. Нижний – в большинстве случаев представляет собой кристаллическое образование. В работе [6] отмечается, что когда в теплоносителе преобладает одна соль, то, как правило, образуются твёрдые отложения – так называемая накипь – отдельные частицы которой прочно связаны между собой и теплообменной поверхностью. Если теплоноси-

тель содержит большое количество солей, то при их отложении между группами кристаллов разных солей могут образовываться пустоты, где оседают суспензированные частицы, уменьшающие прочность отложений.

Обширный материал о свойствах отложений приводится в [1], однако, практическое применение этих данных представляется довольно ограниченным, поскольку они приведены для слоя толщиной $\delta_3 = 5$ мм, а температура теплоносителя не превышает 200°C .

Основным недостатком данных [1] является отсутствие информации о времени работы ТА, необходимым для образования слоя загрязнений толщиной $\delta_3 = 5$ мм, или другого размера.

В работах [3, 4] отмечается, что толщина и свойства слоя загрязнений являются функцией изменяющихся параметров – времени, скорости теплоносителя, температуры, плотности теплового потока и концентрации примесей в теплоносителе.

Таким образом, набор функций перечисленных параметров от времени работы ТА в своей совокупности определяют изменение теплопередачи в процессе эксплуатации теплообменника.

В более поздних публикациях [7] приводится интересная классификация типов загрязнений, а именно – грубые, крупнодисперсные частицы (*carse fouling*), и поверхностные отложения. Причём, считают, что первые в основном влияют на гидравлическое сопротивление и практически не снижают теплопередачи.

В свою очередь поверхностные загрязнения подразделяют на накипь ($\lambda \approx 2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$), биоотложения ($\lambda \approx 0,57 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$) и осадок ($\lambda \approx 1,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$) (или заиливание), образованию которого способствуют крупнодисперсные частицы.

Однако и в этой работе в качестве мероприятия по борьбе со снижением теплопередачи в результате отложений рекомендуется увеличение поверхности теплообмена, которое для $K \approx 2500 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2\text{К}}$ при термическом сопротивлении отложений $\sim 4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}$, может достигать 100 %.

Данные работ [1,2,7,10,17,21] позволяют сделать вывод о том, что термическое сопротивление отложений колеблется в пределах $(1 \dots 8) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}$ для 1200 часов работы, в зависимости от условий эксплуатации, однако ни модели отложений, ни анализ эксплуатационных факторов не приводился.

Одним из путей борьбы с отложениями является подготовка теплоносителя к эксплуатации. Вода, являясь одним из самых распространённых теплоносителей, содержит примеси солей, способствующие отложениям. Однако, несмотря на предварительную подготовку воды в системах отопления и горячего водоснабжения, как отмечается в [8], поверхности ПТА загрязняются. Кроме того, химический состав воды в различных регионах существенно отличается, что влияет на эксплуатационные характеристики теплообменников.

Обзор и анализ работ [3, 6, 7, 8, 9] выявил и общее мнение – а именно – высокую технологичность, надёжность и удобство обслуживания ПТА при очистке теплообменных поверхностей.

Важным фактором, влияющим на изменение теплопередачи в результате отложений, является конструкция аппарата и геометрическая форма поверхности теплообмена [2, 9,27]. Так, согласно [9] в наибольшей степени подвержены загрязнению (в по-

рядке убывания) рубашки охлаждения, пластинчатые теплообменники и трубчатые поверхности, а в меньшей степени – оребренные каналы и спиральные ТА. Причём отмечается, что поверхности с низкими рёбрами способны к «самоочищению» ввиду отслоения отложений в результате температурных перепадов в ребре и несущей поверхности. В доступных источниках данных о сравнительном загрязнении пластин с S-образными и треугольными гофрами не обнаружено, равно, как и влияние соотношений размеров пластины и гофра.

Проблема отложений для пластинчатых теплообменников решается проще, чем для большинства других аппаратов [8, 6]. Высокая степень турбулизации потока между пластинами при сравнительно малых числах Рейнольдса, сводит к минимуму образование большинства разновидностей отложений. Конструкция аппарата позволяет производить очистку поверхности непосредственно на месте. Если необходима очистка вручную, то этот тип теплообменника может быть легко разобран, очищен и собран. Данные, опубликованные Ассоциацией фирм-изготовителей трубчатых теплообменников [12], позволяют сделать вывод о том, что термическое сопротивление отложений вдвое меньше, чем в трубчатых аппаратах.

Использовать данные по отложениям в трубчатых аппаратах не представляется целесообразным, поскольку коэффициенты теплоотдачи в пластинчатых аппаратах намного выше. Однако при отсутствии данных при разработке пластинчатых теплообменников рекомендуется [1, 13, 22] использовать значения термических сопротивлений, не превышающие 1/5 значений для трубчатых аппаратов.

По аналогии с процессами кристаллизации толщина слоя и масса загрязнений могут быть определены следующим образом:

$$\rho_3 F \frac{d\delta_3}{d\tau} = \frac{dm}{d\tau} \quad (4)$$

Изменение массы компонента загрязнений

$$\frac{dm}{d\tau} = \beta F (\Delta c)^4 \quad (5)$$

При допущении линейного изменения концентрации загрязнений для интервала температур жидкости ($t_{ж}$) и загрязнений (t_3) изменение концентрации

$$\Delta c = \epsilon (t_3 - t_{ж}) \quad (6)$$

С учётом (5) и (6) перепишем (4) относительно скорости образования загрязнений ($\frac{d\delta_3}{d\tau}$)

$$\frac{d\delta_3}{d\tau} = \frac{p}{\rho_3} \epsilon^4 (t_3 - t_{ж})^4 \quad (7)$$

Как видно из (7), скорость роста толщины загрязнений пропорциональна температурному напору ($t_3 - t_{ж}$) и коэффициенту массоотдачи. Это выражение также показывает, что чем меньше плотность отложений, тем меньше скорость роста их толщины.

В выражении (7), строго говоря, β также является функцией скорости среды и температуры, что затрудняет практическое его использование.

Скорость образования слоя загрязнений по данным [14,12] может быть представлена как разность факторов отложения ($\overline{\Phi}_m$) и уноса ($\overline{\Phi}_y$):

$$\frac{d\delta_3}{d\tau} = \overline{\Phi}_m - \overline{\Phi}_y. \quad (8)$$

По той же причине (8) также носит скорее теоретический характер, поскольку данных о $\overline{\Phi}_m$ и $\overline{\Phi}_y$ нет.

Экспериментальные данные [16] показывают, что слой отложений, который образовался при низких скоростях потока, может быть размыт и удалён кратковременным повышением скорости. Аналогичный подход, только путём повышения температуры, упоминается в [3]. Таким образом, существуют воздействия подавляющие рост слоя загрязнений.

Ввиду сложностей, возникающих при теоретических исследованиях, экспериментальные данные аппроксимируют простым асимптотическим соотношением [26]

$$\frac{R_3}{R_3^*} = 1 - e^{-Bz}. \quad (9)$$

Такая аппроксимация представляется вполне приемлемой для практических расчётов, однако и (9) не лишено недостатков. Во-первых, – низкая точность в начальной стадии процесса образования загрязнений. Во-вторых, – трудности и условность определения максимально допустимого термического сопротивления загрязнений.

В подавляющем большинстве работ толщина слоя загрязнений анализируется на основе уравнения теплопередачи

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_0} + R_3, \quad (10)$$

где K и K_0 – коэффициент теплопередачи для загрязнённой и чистой поверхности теплообмена соответственно.

В целом, анализ работ за последние сорок лет [1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 14, 21, 22,] показывает, что теплоносители с относительно разными плотностью и теплопроводностью компонентов имеют большую скорость образования отложений; относительно высокий температурный напор приводит к сравнительно быстрому снижению коэффициента теплопередачи; увеличение скорости потока приводит к росту теплоотдачи и некоторому снижению скорости образования отложений, при этом наблюдается существенный рост гидравлического сопротивления.

Таким образом, можно заключить, что расчёт и выбор теплообменного аппарата осуществляется для чистой поверхности, величина которой увеличивается по сравнению с расчётными значениями на 10–15, а иногда и до 50 % с целью компенсации снижения коэффициента теплопередачи в результате отложений.

Уменьшение тепловой нагрузки теплообменника после некоторого периода работы обусловлено тем, что часть температурного напора затрачивается на преодоление термического сопротивления загрязнений поверхности.

Перепад температур в слое отложений пропорционален термическому сопротивлению слоя, что не несёт никакой информации о времени работы ТА, поскольку пе-

репад температур в равной степени зависит и от теплового потока ($\Delta t_3 = qR_3$). Тепловые потоки в процессе эксплуатации могут принимать различные значения. Поэтому, имея одно расчётное значение теплового потока, использование сопротивления слоя загрязнений практически не имеет большого смысла.

Повышение скорости потока, как способ борьбы с отложениями приводит к росту потерь давления, а повышение температуры не всегда достигает эффекта очистки. При этом твёрдые загрязнения не чувствительны к тепловым расширениям. Живое сечение уменьшается, скорость возрастает и, наряду с ростом гидравлического сопротивления до некоторого значения возрастает теплоотдача. Здесь возникают задачи определения времени работы ТА, когда рост теплоотдачи компенсирует влияние отложений, и определения допустимого значения гидравлического сопротивления. Так при уменьшении живого сечения в 1,7 раз потери давления увеличиваются в 2,5–3 раза.

Пластинчатые теплообменные аппараты конструктивно наиболее приспособлены для очистки поверхности и за счёт турбулизации потока при относительно малых числах Re имеют преимущества по устойчивости отложений по сравнению с широко распространёнными трубчатыми ТА. Однако, до настоящего времени отсутствуют зависимости толщины слоя отложений даже, для воды, от скорости потока и времени эксплуатации ТА.

Для отдельных теплоносителей способность образовывать отложения настолько существенна, что может «свести на нет» достоинства самых эффективных поверхностей.

Выводы. Учитывая вышеизложенное, необходима разработка мероприятий по поддержанию околорасчетного значения теплопередачи работающего пластинчатого теплообменника на основе выявления закономерностей изменения термического сопротивления слоя отложений от времени, скорости и типа теплоносителя.

Литература

1. РТМ 26-01-36-70.
2. Пучков П.И., Виноградов О.С. Исследование теплоотдачи и гидравлических сопротивлений каналов с теплоотдающей внутренней поверхностью // Теплоэнергетика, 1964. №10. С. 62–65.
3. Анипко О.Б. Рациональные теплообменные поверхности. Харьков: ХВУ., 1998. 197 с.
4. Шицман М.Е., Егоров Э.Д. О динамике роста отложений солей в интенсивно обогреваемых трубах НРЧ котла СНД блока 300 МВт // Теплоэнергетика. 1969. №4 с. 10–14.
5. Кошкин В.К., Калинин Э.К. Теплообменные аппараты и теплоносители. М. Машиностроение. 1971.
6. Анипко Б.В. Проблема загрязнения теплообменных устройств и прогнозная оценка их термического сопротивления теплопередаче. Препринт ИПМаш АН УССР. Харьков, 1987 г.
7. Ladislav Novak/ Fouling of compact heat exchangers. Alfa-laval/www.alfalaval.com.2004.
8. Пластинчатые теплообменники Альфа – Лаваль – гарантия успеха ваших проектов. АВОК №11, 1996 г.
9. H. Müller – Steinhagen, M.R. Malayeri, A.P. Watkinson Fouling of Heat Exchangers – New Approaches to solve an Old-problem // Heat transfer engineering Vol. 26. №1, 2005. p. 1–4.

10. Бурков В.В., Индейкин А.И. Автотракторные радиаторы. Л.: Машиностроение, 1978.
11. Маньковский О.Н., Толчинский А.Р., Александров М.В. Теплообменная аппаратура химических производств. Л.: Химия, 1976.
12. Reitzer V. Rate of Scale Formation in Tubular Heat Exchangers. Ind Eng Chem. Proc. Das. And Der. 1964. Vol. 3. №4.
13. Справочник по теплообменникам / В. 2-х томах. М. Энергия 1986.
14. Гаврилов А.Ф., Малкин Б.М. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева котельных установок. М.: Энергия. 1980.
15. Кузнецов В.А. Загрязнение конвективных поверхностей парогенераторов инерционными фракциями уноса // Изв. Вузов. Энергетика. 1970. №9. с. 56–62.
16. Уоткинсон, Мартинец. Отложения карбоната на стенах труб теплообменника // Теплопередача, 1975. №4 с. 5–11.
17. Вермс. Термофорез – интенсивное осаждение частиц в межлопаточных каналах решёток газовых турбин// Энергетические машины и установки. 1979. №4. с. 56–64.
18. Жимерин Д.Г. Современные проблемы энергетики. М.: Энергоатомиздат, 1984.
19. Монин О.В., Спокойный Ф.Е. теплообмен цилиндра с поперечным слабозапыленным потоком при наличии сыпучих отложений // Теплоэнергетика. 1982, №9. с. 67–68.
20. Крэйт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир. 1983.
21. Фраас, Оцисик. Расчёт и проектирование теплообменников. М.: Атомиздат. 1971.
22. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. М.: Энергоатомиздат, 1986.
23. Анипко О.Б., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Капустенко П.А. Исследование теплогидравлических характеристик пластинчатых теплообменных аппаратов. Харьков. ХГПУ, 1998. с. 36.
24. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Анипко О.Б. и др. Основы энерготехнологии промышленности. Харьков. НТУ «ХПИ», 2002, 426 с.
25. Анипко О.Б., Гогенко А.Л. Проблема образования отложений на теплообменных поверхностях пластинчатых теплообменников. // Интегрированные технологии и энергосбережение №4, 2004. С. 7–13.
26. Анипко О.Б., Арсеньева О.П., Гогенко А.Л. Изменение термического сопротивления отложений на теплопередающей поверхности работающего теплообменника. \ Сб. наук. праць. XI ВПС., Вип 2(11), 2004. С. 198–202.
27. Anipko O., Gogenko A., Arsenyeva O., Kapystenko P. Accounting for fouling in plate heat exchanger design \ Chemical engineering transaction. Vol.12, 2007. pp. 207–212.

Аніпко О.Б., Новіков А.І., Савченко В.А.

ОСНОВНИ ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА УТВОРЕННЯ ВІДКЛАДЕНЬ І ЗАСОБИ БОРТЬБИ ІЗ ЗАБРУДНЕННЯМИ ТЕПЛООБМІННОЇ ПОВЕРХНІ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТУ

У роботі проаналізовано основні фактори, що впливають на утворення відкладень у ТА. Розглянуто засоби боротьби із забрудненнями теплообмінної поверхні пластинчастого теплообмінного апарату.