

шак, Б. Г. Трясунов // Вестник КузГТУ. – 2005. – № 2 (46). – С. 120-129.

3. Щербин, С. А. Реконструкция узла конденсации и охлаждения деалкилата установки производства бензола «Пиротол» / С. А. Щербин, Г. А. Родионов // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2024. – № 21. – С. 176-180.

4. Щербин, С. А. Оптимальный коэффициент обребрения трубного пучка воздушного конденсатора паров бензина / С. А. Щербин, И. А. Никитина. // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2019. – № 16. – С. 157-161.

5. Кузьмин, С. И. Комплексная оптимизация трубчатого теплообменника / С. И. Кузьмин, С. А. Щербин // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2018. – № 15. – С. 21-27.

6. Щербин, С. А. Определение эксплуатационных затрат на кожухотрубчатый теплообменник / С. А. Щербин, А. А. Глотов // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2020. – № 17. – С. 140-144.

7. Щербин, С. А. Определение капитальных затрат на кожухотрубчатый теплообменник / С. А. Щербин, А. А. Глотов // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2020. – № 17. – С. 136-139.

УДК 621.039.534

Щербин Сергей Анатольевич,

к.т.н., доцент, декан факультета технической кибернетики,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

Синьков Дмитрий Александрович,

обучающийся гр. ТМмз-23-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В ТЕПЛООБМЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Shcherbin S.A., Sinkov D.A.

THE USE OF HIGH-TEMPERATURE HEAT TRANSFER FLUID IN HEAT EXCHANGE EQUIPMENT

Аннотация. В статье рассмотрены основные свойства и особенности применения высокотемпературных теплоносителей для обогрева производственных аппаратов. Приведена классификация теплоносителей, перечислены важнейшие требования к ним.

Ключевые слова: высокотемпературные теплоносители, теплообмен.

Abstract. The article discusses the main properties and features of the use of high-temperature heat carriers for heating industrial apparatus. The classification of heat carriers is given, the most important requirements for them are listed.

Keywords: high-temperature heat carriers, heat exchange.

Значительная доля технологических процессов нефтехимической промышленности протекает при высоких температурах. Интенсивность технологического процесса, а также качество выпускаемого продукта часто зависят от точности поддержания температуры на отдельных стадиях процесса.

При проектировании новых и реконструкции существующих высокотемпературных производств возникает вопрос о способах достижения заданных температур. Наиболее часто для этого применяются обогрев дымовыми газами, насыщенным водяным паром, водой высокого давления и электричеством.

Вместо перечисленных выше обще-

принятых методов обогрева на некоторых современных предприятиях для интенсификации производства и выполнения требований к поддержанию постоянной температуры технологического процесса используется обогрев с помощью высокотемпературных теплоносителей (ВТ) – промежуточных теплоносителей, которые имеют высокую температуру нагрева при сравнительно низком давлении [1].

О возможности применения ВТ для обогрева производственных аппаратов известно давно, однако широкого распространения этот, обладающий целым рядом преимуществ способ обогрева, не получил.

В соответствии с принципом термоди-

намического подобию и на основании анализа опытных данных по физическим постоянным высокотемпературных теплоносителей в работе [2] предложено разделять такие теплоносители на три основные группы:

1. ВТ с металлической связью или жидкометаллические;
2. ВТ с ионной связью или ионные;
3. ВТ с остаточной связью или органические.

Металлы (литий, натрий, калий и ртуть) могут применяться как ВТ в жидком и парообразном состоянии. Жидкометаллические теплоносители имеют самую высокую термическую стойкость. Однако они оказывают и самое большое агрессивное воздействие на конструкционные материалы, поэтому верхний температурный предел их применения определяется максимально допустимой температурой коррозионной стойкости конструкционного материала против агрессивного воздействия на него данного теплоносителя.

Пары жидкометаллических теплоносителей обладают высокой токсичностью, а некоторые, кроме того, при контакте с воздухом и взрывоопасны. Наконец, все жидкометаллические теплоносители при рабочих температурах интенсивно окисляются, поэтому они должны работать в герметичных установках, а в случае применения в жидком состоянии – находиться в атмосфере инертных газов.

В отличие от жидкометаллических только часть ионных теплоносителей может применяться как в жидком, так и в газообразном состояниях. Например, ионные кремнийорганические теплоносители применяются, как правило, только в жидком состоянии, поскольку при кипении в нормальных условиях они подвергаются разложению.

Ионные теплоносители менее термически стойки, чем жидкометаллические, однако они оказывают значительно менее агрессивное воздействие на конструкционные материалы. Предельно допустимая температура применения ионных теплоносителей определяется их термической стойкостью и не превышает 550 °С. Среди ВТ ионные обладают наименьшей токсичностью.

Высокотемпературные органические теплоносители (ВОТ) получили наиболее широкое распространение в различных отраслях промышленности. Они охватывают большое количество циклических, ацикличе-

ских и смешанных соединений и применяются как в жидком, так и в парообразном состоянии в интервале от -47 °С (моноизопротилдифенил) и примерно до 400 °С (терфенилы). Эти теплоносители практически не вызывают коррозию обычных конструкционных материалов, однако, они менее термостойки, чем жидкометаллические теплоносители и большинство ионных.

Все ВОТ горючи. Некоторые из этих теплоносителей, как, например, минеральные масла, в процессе эксплуатации выделяют газообразные продукты разложения, образующие с воздухом взрывоопасные газовые смеси. ВОТ бывают практически нетоксичными и весьма токсичными (например, хлоропроизводные дифенила) веществами. При эксплуатации последних должны предъявляться высокие требования к герметичности нагревательных установок.

Представляет интерес выполнение анализа влияния теплофизических свойств теплоносителей на величину коэффициента теплоотдачи, в общем случае определяемый по выражению:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d, \quad (1)$$

где Nu – критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность теплообмена на границе твердое тело-жидкость; λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К); d – определяющий линейный размер поверхности теплообмена, м. В качестве d , как правило, принимается длина или диаметр (эквивалентный диаметр) поверхности.

На величину критерия Нуссельта влияет множество факторов: физические свойства теплоносителя, скорость и режим его движения, форма, размеры и ориентация поверхности теплообмена в пространстве, температурный напор и другие. Например, при турбулентном режиме движения теплоносителя, агрегатное состояние которого не изменяется, в теплообменных трубках:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \quad (2)$$

где Re – критерий Рейнольдса, характеризующий отношение сил инерции (скоростного напора) к силам вязкого трения и соответственно режим течения теплоносителя; Pr – критерий Прандтля, учитывающий влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу:

$$Re = Wd\rho/\mu, \quad (3)$$

$$Pr = c\mu/\lambda, \quad (4)$$

где ρ ; μ ; c и λ – соответственно плотность, кг/м³; коэффициент динамической вязкости, Па·с; удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К) и коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) теплоносителя; W – скорость теплоносителя в теплообменных трубах, м/с:

$$W = 4 \cdot V \cdot z / (n \cdot \pi \cdot d^2), \quad (5)$$

где V – объемный расход теплоносителя, м³/с; z – количество ходов по трубам; n – количество теплообменных труб, шт.

Учитывая (1)-(5), после преобразования получим:

$$\alpha = \frac{0,025 \cdot V^{0,8} \cdot z^{0,8} \cdot \rho^{0,8} \cdot c^{0,43} \cdot \lambda^{0,57}}{d^{1,8} \cdot \mu^{0,37} \cdot n^{0,8}}. \quad (6)$$

Очевидно, что теплофизические свойства теплоносителя оказывают влияние на интенсивность теплоотдачи. Для повышения α следует увеличивать плотность, теплоемкость и теплопроводность, и наоборот, уменьшать вязкость используемого вещества.

Также значительное влияние на коэффициент теплоотдачи теплоносителя, агрегатное состояние которого в процессе теплообмена не изменяется, оказывает скорость его движения – с увеличением скоростей теплообменных сред можно добиться повышения эффективности теплообменного аппарата.

Однако, как известно из гидродинамики, увеличение скорости потока приводит к повышению затрат энергии на перекачивание среды, что проявляется в уменьшении ее давления. Величина, на которую уменьшается давление среды, пропорциональна квадрату скорости потока и называется гидравлическим сопротивлением.

Поэтому увеличение скорости потока теплоносителя, с одной стороны, повышает эффективность теплопередачи, но, в то же время, существенно увеличивает гидравлическое сопротивление аппарата и затраты на работу насосно-компрессорного оборудования [3-5]. При проектировании теплообменных аппаратов важной задачей является определение оптимальных скоростей потоков теплоносителей, обеспечивающих эффективный теплообмен при приемлемом значении гидравлического сопротивления.

Далее перечислим основные требования, предъявляемые к высокотемпературным

теплоносителям:

- максимальная термическая стойкость, а, следовательно, и наибольшая температура применения. Жидкометаллические теплоносители применяются до 1000 °С и выше, ионные до 500-550 °С и органические до 400 °С (кратковременно до 420-450 °С);

- минимальная температура плавления для упрощения конструкции и эксплуатации нагревательной установки;

- высокая температура кипения при давлении, близком к атмосферному. У жидкометаллических теплоносителей она колеблется от 357 °С до 2270 °С, у ионных от 200 °С до 457 °С и у органических от 197 °С до 389 °С;

- малая вязкость. Чем меньше вязкость теплоносителя, тем при прочих равных условиях интенсивнее теплообмен, тоньше пристеночный ламинарный слой и меньше вероятность перегрева и термического разложения теплоносителя. Также с уменьшением вязкости теплоносителя снижаются энергозатраты на его циркуляцию, облегчается запуск нагревательной установки в холодном состоянии;

- высокая теплоемкость. С увеличением теплоемкости теплоносителя уменьшается его количество и, соответственно, затраты энергии на работу циркуляционного насоса;

- максимальная теплота фазового перехода: чем она выше, тем интенсивнее его теплообмен с теплообменной поверхностью при изменении агрегатного состояния. Наибольшую теплоту конденсации имеют жидкометаллические теплоносители: ее величина при атмосферном давлении составляет 296-19650 кДж/кг. У ВОТ она колеблется от 283 до 814, а у ионных – от 74,9 до 190 кДж/кг;

- минимальное агрессивное воздействие на конструкционные материалы. Наибольшими корродирующими свойствами обладают жидкометаллические теплоносители, в значительно меньшей степени этим свойством обладают ионные и практически не разрушают конструкционные материалы ВОТ;

- малая токсичность. Среди применяемых в настоящее время ВТ токсичность возрастает в следующей последовательности: ароматизированные масла и дифенильная смесь, дитолилметан и арохлоры, пары жидкометаллических теплоносителей – щелочных металлов и их сплавов, кадмия, олова,

висмута, свинца и ртути. Не ядовиты пары галлия и соляные сплавы. Часто применение теплоносителя в промышленности ставят в зависимость от его токсичности. Однако на современном уровне техники ставить вопрос выбора теплоносителя только в зависимости от его токсичности было бы неоправданно;

- пожаро- и взрывобезопасность. Горючими в большей или меньшей степени являются щелочные металлы, кремнийорганические и органические высокотемпературные теплоносители, за исключением арохлоров. При горении кремнийорганических теплоносителей образуется двуокись кремния в виде дыма, что препятствует дальнейшему горению.

Органические теплоносители горят медленно, коптящим пламенем. Весьма энергично горят на воздухе щелочные металлы. Пожароопасность теплоносителя можно оценивать по температурам вспышки, воспламенения и самовоспламенения.

Существует большое разнообразие высокотемпературных теплоносителей, свойства которых изменяются в широком диапазоне. При выборе теплоносителя необходимо учитывать все предъявляемые требования.

Кроме того, для обоснованного выбора теплоносителя требуется выполнение теплового и гидравлического расчета оборудования, в котором он будет использоваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лукомский, С. М.** Высокотемпературные теплоносители и их применение / С. М. Лукомский. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1956. – 54 с.

2. **Чечеткин, А. В.** Высокотемпературные теплоносители / А. В. Чечеткин. – Москва : Энергия, 1971. – 496 с.

3. **Кузьмин, С. И.** Комплексная оптимизация трубчатого теплообменника / С. И. Кузьмин, С. А. Щербин // Сборник научных трудов АНГТУ. – 2018. – № 15. – С. 21-27.

4. **Щербин, С. А.** Определение эксплуатационных затрат на кожухотрубчатый теплообменник / С. А. Щербин, А. А. Глотов // Сборник научных трудов АНГТУ. – 2020. – № 17. – С. 140-144.

5. **Щербин, С. А.** Определение капитальных затрат на кожухотрубчатый теплообменник / С. А. Щербин, А. А. Глотов // Сборник научных трудов АНГТУ. – 2020. – № 17. – С. 136-139.