

УДК 536.242

Влияние рабочего тела на массогабаритные характеристики теплообменного аппарата

Шингаркина Т. А., студент

*Россия, 105005, г. Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»*

Научный руководитель: Бурцев С.А., к.т.н., доцент

Россия, 105005, г. Москва МГТУ им. Н.Э. Баумана

burtsev@bmstu.ru

Введение

В современном теплообменном оборудовании достаточно точно определяется влияние свойств теплоносителей и параметров теплообменной поверхности на эффективность процессов теплообмена. Однако практически все накопленные эмпирические данные относятся к исследованию теплообмена на воде (паре), воздухе, продуктах сгорания и природном газе.

Кроме того, есть достаточно большое количество данных по теплообмену на чистых веществах (пары металлов, углекислый газ и т.д.). При этом область смесей газов оставалась мало изученной. Анализ литературных данных показывает, что смеси близких по молекулярному весу и строению веществ не обладают какими-либо специфическими особенностями и могут быть описаны закономерностями, полученными для воздуха или пара с вводом соответствующих поправок.

Значительно сложнее описать процессы теплообмена для разномолекулярных смесей, особенно если это касается смесей «тяжелых» молекул и атомов с «легкими». Если речь идет о смесях сложных соединений, состоящих из 4 и более компонентов, то они также могут быть описаны закономерностями, полученными для воздуха или пара с вводом соответствующих поправок.

Последние годы тема исследования теплофизических и транспортных свойств рабочего тела очень популярна (см. работы [1, 2]). Выбор рабочего тела играет очень существенную роль при расчете замкнутых газотурбинных установок [3, 4] и устройств энергоразделения [5, 6, 7].

Одним из перспективных направлений является использование бинарных смесей инертных газов в качестве рабочего тела [1]. Инертные газы химически неактивны, что

позволяет избежать проблем с коррозией элементов установки, а также обеспечить безопасность работы установки (в отличие от бинарных смесей с водородом).

Гелий (He), являясь самым дешевым инертным газом, обладает наилучшими термодинамическими и транспортными характеристиками. Однако из-за своей небольшой молекулярной массы, он значительно повышает аэродинамическую нагрузку на лопасти крыльчатки, что приводит к увеличению габаритов и массы установки, необходимых для обеспечения прочности. Инертные газы с более высокой молекулярной массой, такие как неон (Ne), аргон (Ar), криптон (Kr) и ксенон (Xe), обладают заметно худшими теплофизическими характеристиками, но при их использовании в качестве рабочих тел аэродинамическая нагрузка значительно снижается, что позволяет, в свою очередь, снизить массу и размеры установки, а также число ступеней при применении осевой машины.

Теплофизические свойства любого газа характеризуется числом Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda},$$

где μ - коэффициент динамической вязкости,

C_p - удельная изобарная теплоемкость газа,

λ - коэффициент теплопроводности.

Известно, что при использовании модели одноатомного газа, число Прандтля равно 2/3. У чистых газов (He, Xe, Ar, Ne) и воздуха значение критерия Прандтля находится в пределах $Pr \approx 0.65-0.73$ в диапазоне температур 250-1500 К [8].

Бинарная смесь одноатомных газов с большей и меньшей молекулярной массой имеет более низкий критерий Прандтля, чем простые газы. Например, для смесей гелий-аргон (He-Ar), гелий-криптон (He-Kr), гелий-ксенон (He-Xe) критерии Прандтля варьируются между 0.2 и 0.67 [9] в зависимости от процентного состава компонентов.

Различные исследования показали, что используя бинарные смеси на основе He можно значительно снизить массу и габариты турбомшины [10]. В данной работе проанализировано и с помощью теоретических расчетов показано, насколько можно уменьшить размеры (и, соответственно, массу) одного из узлов замкнутой газотурбинной установки, а именно - теплообменного аппарата.

Исследование

Была проведена обширная работа по расчету свойств бинарных смесей инертных газов (He-Ne, He-Ar, He-Xe, He-Kr) и в качестве основной смеси выбрана He-Xe смесь.

Был спроектирован теплообменный аппарат с противоточной схемой движения теплоносителя и пластинчато-ребристыми поверхностями Плр-6 и Плр-8. В качестве теплоносителя были проанализированы чистые инертные газы и смесь He-Xe с соответствующими средними значениями молекулярной массы.

Теплоемкость газовой смеси определяется по формуле [11]:

$$\Delta C_{pсм} = \sum_{i=1}^n m_i c_{pi},$$

где m_i – молярная доля компонента смеси, имеющего теплоемкость c_{pi} .

Вязкость газовой смеси может быть оценена по формуле Манна [11]:

$$\frac{1}{\nu_{см}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\nu_i},$$

где m_i – молярная доля компонента смеси, имеющего кинематическую вязкость ν_i .

Более точные результаты дает эмпирическая формула:

$$\eta_{см} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \sqrt{\mu_i \cdot T_{кри} \cdot \eta_i}}{\sum_{i=1}^n n_i \sqrt{\mu_i \cdot T_{кри}}},$$

где n_i – объемная доля компонента,

μ_i – молекулярная масса,

$T_{кри}$ – критическая температура,

η_i – динамическая вязкость.

Вязкость многокомпонентной газовой смеси может быть так же рассчитана по формуле [11]:

$$\eta_{см} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n y_i \Phi_{ij}}},$$

где y_i – молярная доля компонента смеси, Φ_{ij} – параметр смеси, для расчета которого существует множество методов, например аппроксимация Вильке [11]:

$$\Phi_{ij} = k \frac{\left[1 + \left(\eta_i / \eta_j \right)^{1/2} \left(M_j / M_i \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8(1 + M_j / M_i) \right]^{1/2}},$$

где η – вязкость,

M – молярная масса.

Погрешность данного метода составляет менее 1%.

Коэффициент теплопроводности для смесей неполярных газов, не сильно отличающихся по молекулярной массе (например, сухой воздух) [11]:

$$\lambda_{cm} = \sum_{i=1}^n m_i \lambda_i,$$

где m_i – молярная доля i -го компонента смеси,

λ_i – коэффициент теплопроводности i -го компонента смеси.

В случае, если приходится иметь дело со смесями полярных и неполярных компонентов, лучшие результаты дает формула:

$$\lambda_{cm} = \sum_{i=1}^n m_i \lambda_i \left[1 + \frac{\sum m_p - (\sum m_p)^2}{3.5} \right],$$

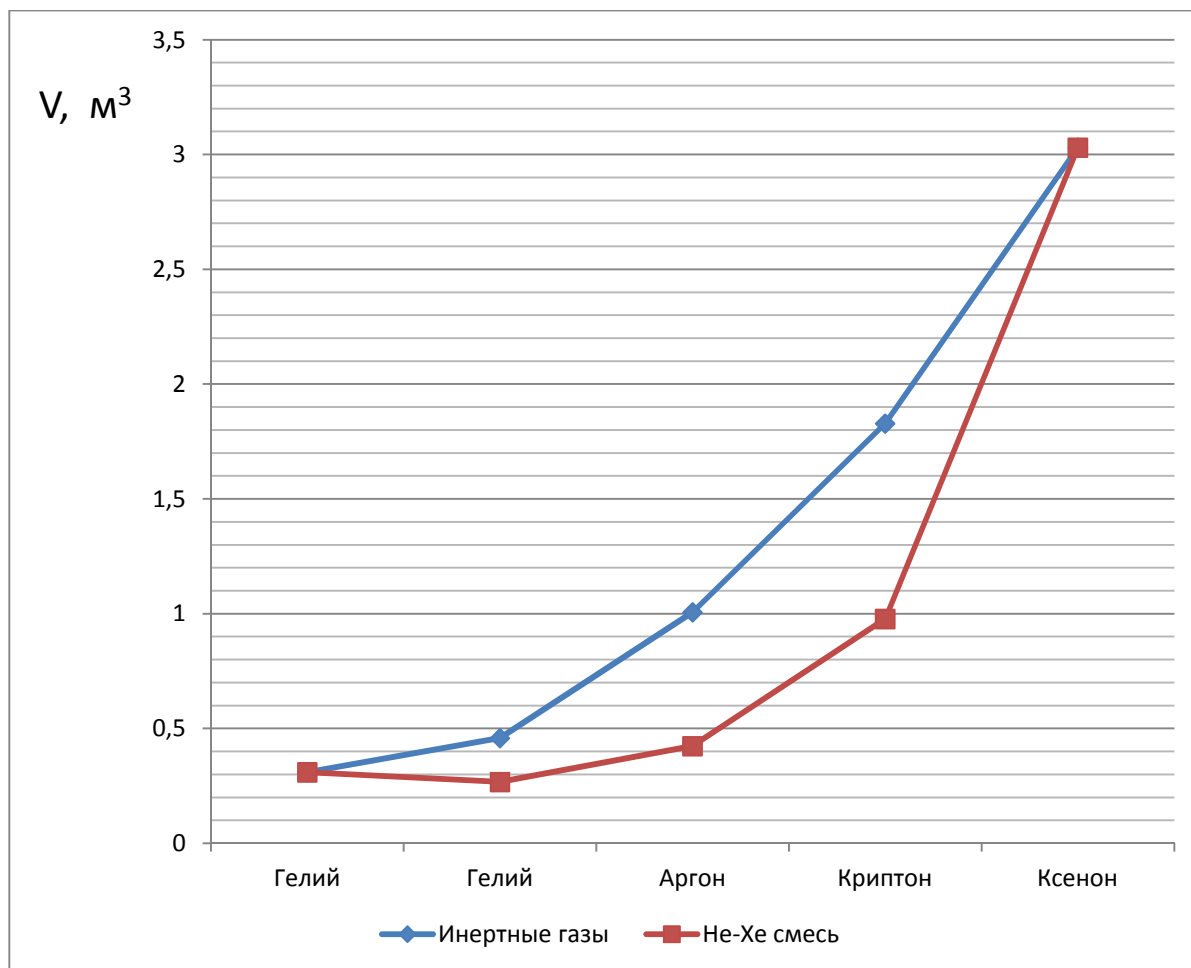
где $\sum m_p$ – сумма молярных долей полярных компонентов.

Следует отметить, что формулы в той или иной мере использующие правило аддитивности, дают результат тем лучше, чем меньше отличаются физические свойства компонентов, составляющих газовую смесь.

Расчеты размеров ТОА производились в программе Mathcad по методике [12]. Для определения значения критерия Прандтля чистых инертных газов и бинарной смеси He-Xe в зависимости от температуры, давления и состава использовалась автоматизированная расчетная система Tetra.

После расчета теплообменного аппарата с теплоносителем аргон, он был принят в качестве эталонного. В последующих расчетах менялся теплоноситель и его физические параметры, при этом тепловой поток оставался прежним.

Как и ожидалось, увеличение теплопроводности газа привело к снижению массы и размеров теплообменных аппаратов, что показано на графике зависимости объема ТОА от используемого теплоносителя при постоянном тепловом потоке.



Например, замена неона гелиево-ксеноновой смесью с такой же молекулярной массой дает возможность снизить объем и, соответственно, массу теплообменного аппарата больше, чем в два раза.

Заключение

Отработана численная методика определения значения критерия Прандтля для смесей газов с помощью программы Tetra.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о целесообразности применения He-Ne смесей (или аналогичных других бинарных смесей «легких» и «тяжелых» компонентов) в теплообменных аппаратах.

Список литературы

1. Кочуров Д.С. Исследование транспортных и теплофизических свойств бинарных смесей инертных газов с использованием автоматизированной системы расчета Tetra // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Электрон. журн. 2014. № 5. Режим обращения <http://sntbul.bmstu.ru/doc/708327.html> (дата обращения 12.01.2015).

2. Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния доли гелия на значение критерия Прандтля газовых смесей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С. 314-329. DOI: 10.7463/0514.0710811.
3. Арбеков А.Н. Выбор рабочего тела для замкнутых газотурбинных установок мощностью от 6 до 12 кВт, работающих на органическом топливе // ТВТ. 2014. Т. 52. № 1. С. 131-135. DOI: 10.7868/S0040364414010013.
4. Арбеков А.Н., Суровцев И.Г., Дермер П.Б. Эффективность теплопередачи в рекуперативных теплообменниках с высокоскоростными газовыми потоками при низких числах Прандтля // ТВТ. 2014. Т. 52. № 3. С. 463–468. DOI: 10.7868/S004036441403003X.
5. Бурцев С.А. Методика расчета устройств газодинамической температурной стратификации при течении реального газа // Тепловые процессы в технике. 2013. № 9. С. 386-390.
6. Бурцев С.А. Исследование путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения // ТВТ. 2014. Т. 52. № 1. С. 14-21. DOI: 10.7868/S0040364414010062.
7. Бурцев С.А. Оптимизация геометрии сверхзвукового канала в устройстве для энергоразделения. // Вестник МГТУ. Серия Машиностроение. 1999. № 2. С. 48-54.
8. Научные основы технологий XXI века / под ред. А.И. Леонтьева, Н.Н. Пилюгина, Ю.В. Полежаева, В.М. Поляева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 135 с.
9. Tijani M.E.H., Zeegers J.C.H., de Waele A.T.A.M. Prandtl number and thermoacoustic re-frigerators // The Journal of the Acoustical Society of America. 2002. V. 112, N. 1. P. 134-143.
10. El-Genk M.S., Tournier J-M. Selection of noble gas binary mixtures for Brayton space nuclear power systems // 4th International energy conversion engineering conference (IECEC): proceedings. Paper AIAA-2006-4168. DOI: 10.2514/6.2006-4168.
11. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия, 1982. 592 с.
12. Грязнов Н.Д., Епифанов В.М., Иванов В.Л., Манушин Э.А., Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок. М: Машиностроение, 1985. 360 с.