3. Вулис Л.А. Термодинамика газовых потоков [Текст] / Л.А. Вулис – М.:Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 304 с.
4. Степанов И.Р. Некоторые задачи движения газа и жидкости в каналах и трубопроводах энергоустановок [Текст] / И.Р. Степанов, В.И. Чудинов – Л.: Наука, 1977. – 200 с.
5. Живица В.И. Интенсификация процессов в контактных охладителях аммиачных холодильных установок [Текст] / В.И. Живица // Холодильная техника и технология. – 2002. – № 2 (76). – С. 24-28.
6. Коновалов Д.В. Газотурбинный двигатель простого цикла с турбиной перерасширения и термопрессором [Текст] / Д.В. Коновалов, А.Н. Радченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (674). – С. 98–101.

УДК 621.56/.59

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЖЕКТОРОВ ТЕПЛООБМЕННИКОВ И ИХ ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Когут В. Е. к.т.н., доц., Бутовский Е. Д. аспирант, Хмельнюк М. Г. д.т.н., проф.
Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики,
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Применение эжекторов типа контактных струйных теплообменников позволяет эффективно использовать их в различных технологических процессах. В статье акцентируется внимание на применении данных аппаратов при решении наиболее важных актуальных задач нефтеперерабатывающей отрасли. Так же предлагается использовать жидкий инертный газ в процессах сохранения паров углеводородов, охлаждении паров хладагента в многоступенчатых промышленных холодильных установках, и в системах очистки дымовых газов на ТЭЦ и др.

Предлагаемые аппараты позволяют эффективно решать вопросы энергосбережения и рационального потребления топливно-энергетических ресурсов предприятий нефтеперерабатывающей отрасли. Данные схемные решения в промышленности являются приоритетным направлением политики энергосбережения.

Application of ejectors of type of contact jet heat interchangers allows to use effectively them in various master schedules. In a paper the attention is focused on application of the given devices at the decision of the most important actual problems of oil refining branch.

As it is offered to use liquid inert gas in processes of preservation of steams of hydrocarbons, refrigeration of steams of a coolant in the multiple-stage industrial refrigerating machinery, and in descaling systems of smoke gases on thermal power station, etc.

Offered devices allow to solve effectively questions of power savings and rational consumption of fuel and energy resources of the operations of oil refining branch. The given circuit decisions in the industry are a priority direction of a policy of power savings.

Ключевые слова: термопрессор, термоконденсатор, эжектор, эжекторный конденсационный фильтр, струйные аппараты, испарительное охлаждение, контактный теплообмен, электрофильтр, фильтрационный модуль, дымовые газы.

В настоящее время эжекторы, как контактные струйные теплообменники, эффективно применяются в конденсационных процессах, охлаждении паров хладагентов, в 2-х ступенчатых холодильных промышленных установках, в системах очистки дымовых газов. В данной статье рассматривается применение 3-х видов эжекторов при решении различных промышленных задач.

Таблица 1 – Виды эжекторов теплообменников

Эжектор теплообменник		
Термопрессор (промежуточный охладитель)	Термоконденсатор эжектор	Эжекторный конденсационный фильтр

В многоступенчатых холодильных промышленных установках предлагается использование термопрессора после компрессора низкой ступени для более эффективного охлаждения паров хладагента.

В нефтегазовой промышленности для сохранения углеводородов нефтепродуктов, конденсации паров в различных технологических режимах предлагается использовать новое, более эффективное устройство — термоконденсатор эжектор.

В системах очистки дымовых газов на ТЭЦ и других объектах промышленности в дополнение к уже существующим фильтрам, системам очистки предлагается использовать эжекторный конденсационный фильтр.

Термопрессор (промежуточный охладитель)

В современных промышленных установках для снижения температуры пара перед компрессором ступени высокого давления может быть применено испарительное контактное охлаждение путем впрыска распыленного жидкого хладагента в поток перегретого пара. Для более эффективного снижения температуры пара перед компрессором лучше всего использовать впрыскивать азот или углекислоту в мелкодисперсном состоянии.

В области дозвуковых скоростей при данном виде охлаждения можно повысить полное давление потока (так называемый термогазодинамический эффект). Такой процесс возможно осуществить в специально разработанном аппарате — ***термопрессоре***. Данный аппарат был разработан в академии холода. На рис. 1 показана схема термопрессора.

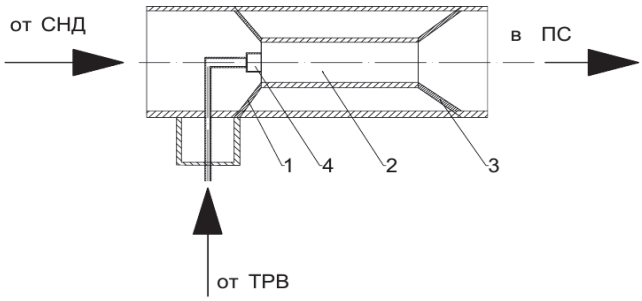


Рис. 1 - Схема термопрессора

Предложенный термопрессор состоит из конфузора 1, камеры смешения 2, диффузора 3, и форсунки 4. Данная модель термопрессора отличается от существующих на рынке тем, что в ней изменены величины углов раскрытия конфузора и диффузора для более эффективной работы.

Поток горячего пара хладагента в конфузоре приобретает скорость 80-100 м/с. В камеру смешения подается мелкодисперсный жидкий хладагент, приводящий к интенсивному теплообмену, смешению потоков и, как следствие — испарение жидкого хладагента и охлаждение потока горячего пара. На выходе из термопрессора в зоне диффузора оставшиеся капли жидкого хладагента полностью испаряются, поток пара замедляется.

Термопрессор в системе устанавливается внутри нагнетательного трубопровода ступени низкого давления, который изолируется, в непосредственной близости от промежуточного сосуда.

Жидкий хладагент (азот или углекислота) поступает в змеевик промсосуда, переохлаждается, после чего дросселируется в циркуляционный ресивер низкого давления, часть его подается в термопрессор, при этом дросселирование происходит в форсунке. Форсунку следует устанавливать вдоль продольной оси термопрессора так, чтобы её срез был в начале камеры смешения. Форсунка может быть любой конструкции, главная её задача — получение минимально возможного диаметра капель впрыскиваемого хладагента — до 0,05 см. Компрессор низкого давления всасывает пары из циркуляционного ресивера и нагнетает через термопрессор в промежуточный сосуд. В термопрессоре осуществляется необходимый процесс охлаждения потока пара.

Подача жидкого хладагента в термопрессор осуществляется при помощи терморегулирующего вентиля (ТРВ). ТРВ подбирается по производительности из условия 0,15 ÷ 0,2 от холодопроизводительности установки. Так как дросселирование жидкого хладагента (азота или углекислоты) происходит в форсунке термопрессора, то дросселирующая дюза на выходе ТРВ изымается.

Расчет термопрессора ведется для минимально допустимого давления конденсации при максимально допустимой температуре кипения — для критически опасных условий работы промежуточного охладителя. Термопрессор внедрен в компрессорных цехах на предприятиях холодильной промышленности Украины и Казахстана.

Термоконденсатор эжектор

Эжекторы в качестве струйных аппаратов с большим успехом используются во многих промышленных отраслях, таких как, химическая, нефтегазовая, экологическая, аэрокосмическая, а также в холодильной отрасли. Простая конструкция и высокая надежность струйных эжекторов позволяет им соответствовать разнообразным требованиям. Стоимость их производства и приобретения весьма незначительна, малые размеры допускают их размещение в трубах в любом положении; не имея вращающихся деталей, они почти не подлежат износу. Эжекторы работают без утечек, помех, не нуждаются в техосмотре и обладают в связи с этим высокой производственной безопасностью.

В данной статье внимание акцентируется на новом конструктивном решении эжектора. Новый усовершенствованный эжектор получил название термоконденсатор эжектор.

Термоконденсатор эжектор является аппаратом с изменением агрегатного состояния потока. Целью его создания было решение задачи промышленности в вопросах полной конденсации паров воздушной смеси с углеводородами.

Отсасываемый поток воздушной смеси с углеводородами ускоряется в конфузоре термоконденсатора эжектора до скорости М = 0.3 (число Маха Маевского). Далее в камеру смешения через мелкодисперсную форсунку впрыскивается поток жидкого хладагента (охлажденные углеводороды; углекислота; азот). В ней происходит мгновенный теплообмен между средами, и воздушная смесь с углеводородами моментально конденсируется. Не сконденсированные пары углеводородов в камере смешения, полностью конденсируются на выходе из диффузора термоконденсатора эжектора.

Отвод тепла осуществляется путем контактного теплообмена и испарительного охлаждения за счет впрыскиваемой в газовый поток мелкодисперсного жидкого хладагента.

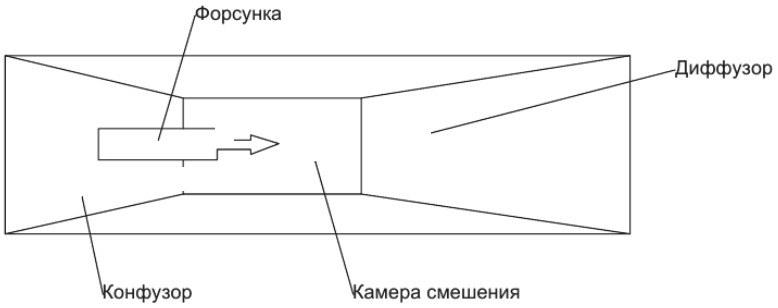


Рис. 2 – Схема термоконденсатора эжектора для конденсации углеводородов

Термоконденсатор эжектор представляет собой конструктивно измененный струйный аппарат. В камере смешения термоконденсатора эжектора происходит интенсивный теплообмен с моментальным фазовым переходом. Это достигается путем впрыска мелкодисперсного охлажденного жидкого хладагента в перегретый газообразный воздушный поток с углеводородами с высокой скоростью до 80-100 м/с.

Сила интенсивности испарения жидкого хладагента (жидкость испаряется полностью мгновенно), охлаждает перегретый газообразный воздушный поток с углеводородами, вследствие чего происходит полная мгновенная конденсация паров углеводородов.

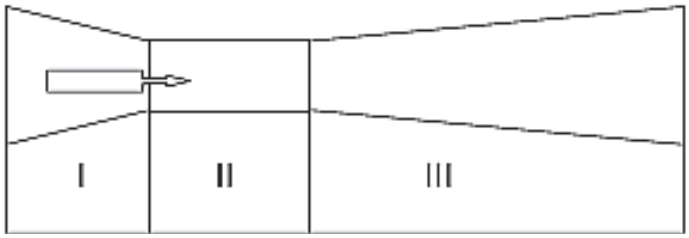
Работа термоконденсатора эжектора

В термоконденсаторе эжекторе протекает множество различных физических явлений и процессов, которые базируются на законах сохранения энергии, вещества и все они взаимосвязаны между собой.

В термоконденсатор эжектор через конфузор поступает газообразный воздушный поток с легкокипящими углеводородами с высокой скоростью. Далее в камеру смешения впрыскивается мелкодисперсный охлажденный жидкий хладагент с меньшей скоростью.

Наиболее важные явления процесса, протекающего в камере смешения термоконденсатора эжектора — это моментальное столкновение капель охлажденного хладагента с парами перегретых углеводородов, и как следствие, моментальная конденсация из основного потока паровоздушной смеси легкокипящих углеводородов. Не смотря на то, что все явления данного процесса проходят одновременно, есть преобладание каждого из них в своей части рассматриваемого процесса. Поэтому необходима оценка каждого явления в отдельности для качественного анализа всего процесса, протекающего в термоконденсаторе эжекторе.

На рис. 5 показаны 3 зоны термоконденсатора эжектора, в которых протекает каждое из явлений процесса моментальной конденсации легкокипящих углеводородов.



I зона – ускорения потока газа состоящего из воздуха и паров легкокипящих углеводородов, за счет сужения конфузора (подготовка к контактному теплообмену);
II зона – активного контактного теплообмена между основным потоком газа и впрыскиваемой жидкостью (мгновенное охлаждение газа);
III зона – торможения потока и конденсация углеводородов из газовой смеси (воздух перегрет, а углеводороды значительно переохлаждены).

Рис. 3 – Распределение зон по длине термоконденсатора эжектора

Термоконденсатор эжектор разработан в институте холода и испытан на предприятии «Инжмаш».

Теплообменник для конденсации дымовых газов

Топливно-энергетическая отрасль является одной из наиболее развитых и мощных в большинстве стран мира в силу создания ею продукции, определяющей стратегическую безопасность, и комфортные условия жизни населения страны.

Дымовой газ — это отработанный газ, выпускаемый в атмосферу после технологических процессов через трубу. Очистка дымовых газов заключается в необходимости удаления из них различных веществ, загрязняющих атмосферу (пример: диоксиды, фураны, кислые газы и тяжелые металлы).

При полном сгорании топлива дымовые газы, уходящие из топки, содержат двуокись углерода CO_2, пары H_2O (образующиеся при сгорании водорода топлива), сернистый ангидрид SO_2, азот N_2 — нейтральный газ, поступивший в топку с кислородом воздуха, азот из состава топлива H_2, а также кислород избыточного воздуха O_2. При неполном сгорании топлива к указанным элементам добавляются еще окись углерода CO, водород H_2 и метан CH_4. Для удобства подсчетов продукты сгорания разделяют на сухие газы и водяные пары. Объем сухих газов принимают за 100%.

Таблица 1 – Состав природного газа и воздуха

Качественный состав газообразного топлива				
Водород, H_2	Угарный газ, CO	Углеводороды, C_m, H_m	Углекислый газ, CO_2	Азот, N_2
Состав воздуха				
Кислород, O_2	Инертные газы		Азот, N_2	

Количество теплоты, выделившейся при сгорании единицы топлива с образованием водяного пара (при температуре продуктов сгорания не ниже 100 °C при атмосферном давлении), называют низшей теплотой (PCI) сгорания. Если же в составе продуктов сгорания влага находится в жидком фазовом состоянии (вода), то результирующее количество теплоты называют высшей теплотой сгорания топлива (PCS). Следовательно, низшая теплота сгорания отличается от высшей расходом теплоты на испарение влаги, содержащейся в топливе и образующейся при сгорании водорода. Вследствие этого при сжигании влажного топлива с высокой долей водорода высшая и низшая теплота сгорания существенно различаются.

При определенных условиях дымовые газы при охлаждении начинают конденсироваться. При этом процессе выделяется дополнительное количество теплоты (скрытая теплота парообразования (r)).

$$\sum PCI + r = PCS,$$

где PCI — низшая теплота сгорания топлива;

r — скрытая теплота парообразования;

PCS — высшая теплота сгорания топлива.

Выброс бросового тепла дымовых газов значительно загрязняет окружающую среду и приводит к повышению температуры поверхности Земли. Благодаря современным технологиям становиться возможно более полно использовать теплоту дымовых газов, тем самым увеличив КПД котлов ТЭЦ до значений 110...120 %. Потеря теплоты с уходящими дымовыми газами занимает основное место среди теп-

ловых потерь котла и составляет около 5...7% вырабатываемой теплоты. Кроме теплоты дымовых газов возможно использование теплоты конденсации водяных паров, образующихся при сжигании влажного топлива. Количество выделяемой теплоты при конденсации водяных паров зависит от вида топлива и находится в пределах от 3,8 % для жидких топлив и до 11,2 % для газообразных (у метана) и определяется как разность между высшей и низшей теплотой сгорания топлива (табл. 2).

Таблица 2 – Значения PCS и PCI для разных видов топлива

Тип топлива	PCS (Ккал)	PCI (Ккал)	Разница (%)
Дизельное топливо	10,6 /кг	10,21 /кг	3,82
Керосин	10,7 /кг	10,29 /кг	3,98
Печное топливо	10,2 /кг	9,76 /кг	4,51
Метан	9,53 /л	8,57 /л	11,2
Пропан	23,85 /л	21,6 /л	10,42
Бутан	30,50 /л	28,3 /л	7,77

В процессе горения углеводородного топлива обязательно синтезируется вода в результате пиролиза молекул углеводорода с последующим горением полученных продуктов пиролиза топлива. Поэтому дымовые газы углеводородного топлива всегда содержат водяной пар, синтезированный в процессе пиролиза и горения топливного вещества. К углеводородному топливу можно отнести практически всю существующую на сегодняшний день органику — природный газ, нефть, уголь и продукты их переработки.

Покинув высокотемпературную зону горения, дымовые газы начинают отдавать тепло и охлаждаться. Охладившись до температуры «точки росы», водяной пар начинает конденсироваться на поверхности теплообменника котла и его дымовых труб. Место, где температура дымовых газов соответствует «точке росы» и где начинается конденсация водяного пара — называется «зона конденсации».

За определение температуры точки росы, принимается такая температура, при охлаждении до которой, из воздуха, начинает конденсироваться водяной пар. Составим экспериментальным путем таблицу зависимости точки росы от влажности и температуры воздуха.

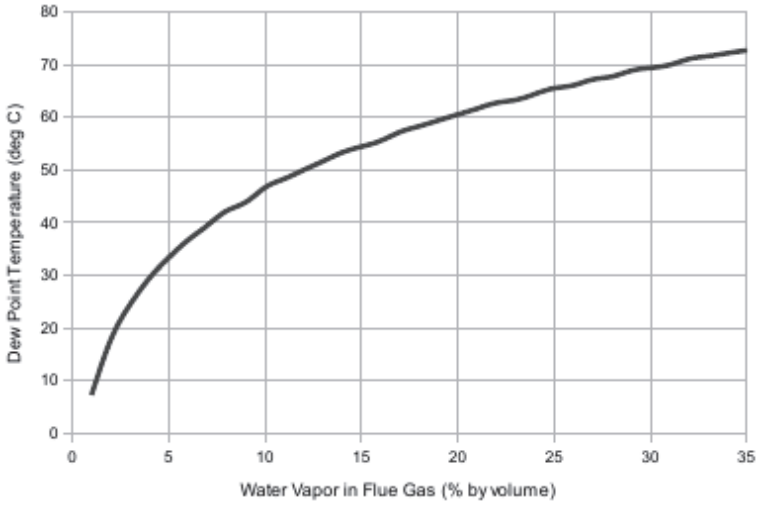


Рис. 4 – Температура точки росы дымовых газов

Системы очистки дымовых газов

Анализ способов глубокой очистки дымовых газов показал, что глубокая очистка дымовых газов, насыщенных водяным паром, достигается в результате мокрой, полусухой или сухой очистки, за счет стадии конденсации, при этом основное количество водяного пара конденсируется благодаря охлаждению очищаемых дымовых газов. Этот процесс выгодно отличается тем, что обеспечивает настолько тонкую очистку отходящих газов от газообразных примесей, частиц пыли и аэрозолей, что их остаточное количество не превышает установленных нормативных значений.

Существующие способы по снижению вредных примесей при сжигании топлива сложны технологически, снижают к.п.д. установок, не достаточно эффективны и не позволяют одновременно сократить выход всех или основных наиболее токсичных компонентов. В некоторых случаях уменьшение образо-

вания одной примеси сопровождается увеличением другой. Существующие способы улавливания вредных примесей в дымовых газах, в основном, предназначены для борьбы с одним компонентом. Конструктивно сложны, энергоемки и требуют больших капитальных и эксплуатационных затрат. Внедрение нескольких способов, с целью улавливания ряда основных вредных примесей, предопределяет строительство комплекса сооружений по площадям, объемам и затратам соизмеримых с самими предприятиями.

В Украине, вследствие вышеуказанных причин, существующие способы улавливания вредных примесей в дымовых газах не нашли широкого применения. Практически все работающие предприятия топливно-энергетического комплекса страны эксплуатируются без пылегазоулавливания.

Кардинальное сокращение всех вредных выбросов дымовых газов от стационарных источников энергетики, и приведение их к безопасной концентрации возможно только при комплексном подходе к данной проблеме. Данный подход заключается в применении современного оборудования, технологий и чистых видов топлива, снижения образования вредных примесей и их улавливания в дымовых газах. Исходя из выше сказанного логично отметить следующее — способы улавливания пыли и токсичных газов должны обеспечивать высокоэффективное и комплексное улавливание основных компонентов, быть безопасными, и иметь сравнительно небольшие капитальные и эксплуатационные затраты. Кроме того, способы должны предусматривать возможность последующей утилизации уловленных примесей, так как в дымовых газах содержится ряд компонентов, являющихся, с одной стороны, вредными веществами, а с другой — ценным продуктом. Например, пятиокись ванадия, стоимость которой на международном рынке составляет 4,2-5 тыс. долларов за тонну.

Напряженная экологическая обстановка в различных регионах, особенно в промышленных, определяет актуальность данной работы. Для тонкой очистки дымовых газов предлагается использовать эжекторный конденсационный фильтр контактного теплообменника, который основан на методе охлаждения потока дымовых газов ниже точки росы. Его применение может обеспечить высокую интенсивность теплообмена, превышающую на порядок коэффициенты теплоотдачи при конвективном теплопереносе.

Основное и главное его отличие от используемых на ТЭЦ фильтров для очистки — полная конденсация компонентов дымовых газов путем впрыска мелкодисперсного жидкого хладагента (азота или углекислоты) в поток дымовых газов с температурой до 200 °С. И включение в уже существующие системы очистки на ТЭЦ.

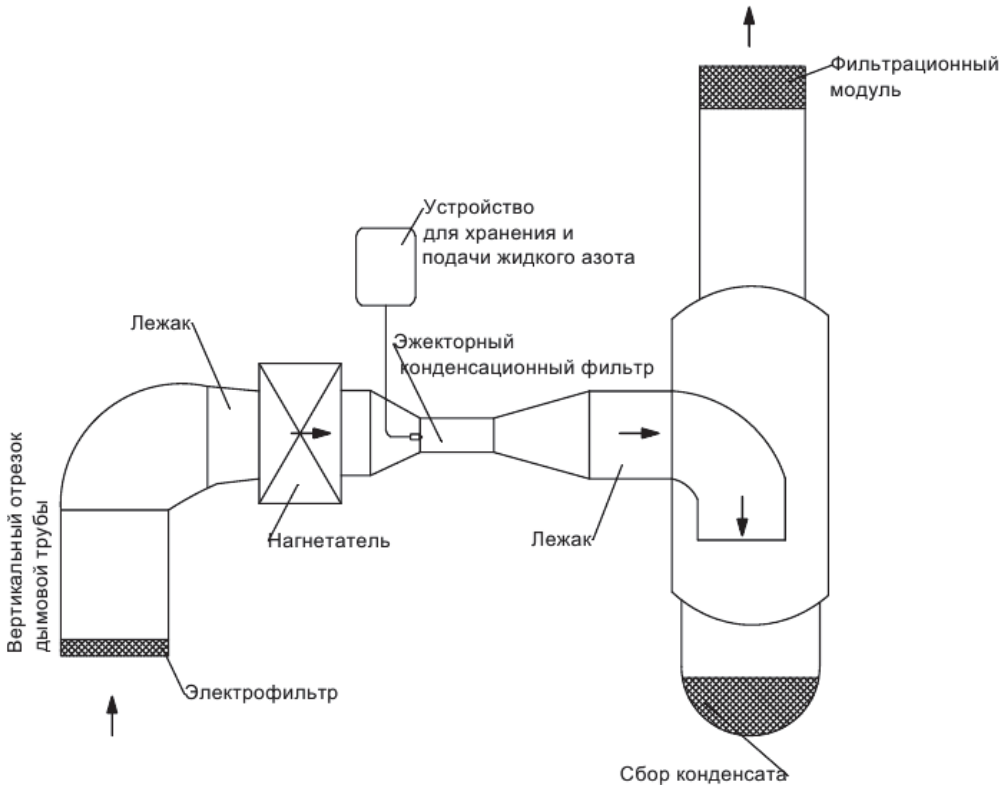


Рис. 5 – Схема применения эжекторного конденсационного фильтра в системе фильтрации дымовых газов

Влажные дымовые газы направляются через электрофильтр по вертикальному участку дымовой трубы, к нагнетателю, где их ускоряют до 30 м/с, и направляют в эжекторный конденсационный фильтр, который имеет конструкцию эжектора, где газы ускоряются до 80...100 м/с в конфузоре эжекторного конденсационного фильтра. В горячий поток дымовых газов, до 200...220 °С, впрыскивается через форсунку мелкодисперсный жидкий хладагент (азот или углекислота) в камеру смешения.

В камере смешения происходит мгновенный теплообмен из-за лобового столкновения горячих дымовых газов и холодного жидкого хладагента. Вследствие этого происходит мгновенное охлаждение и конденсация дымовых газов. Далее они проходят через пропускное сечение диффузора эжектора в тройник трубопровода (прим автор. играет роль отделителя жидкости), где теряют скорость, и часть дымовых газов, которую получилось сконденсировать, направляется на цели потребителя; а остаточная часть дымовых газов, проходит через фильтрационный модуль, где очищается до значений ниже допускаемых норм, в атмосферу.

Выводы

Применение термопрессора повышает эксплутационную надежность холодильной установки, повышает экономичность, упрощает автоматизацию установки.

Всё это достигается за счет того, что промежуточное охлаждение происходит в аппарате, не имеющем большого количества холодильного агента. Впрыскиваемое количество холодильного агента для необходимого охлаждения на несколько порядков меньше, чем объем «мёртвого» пространства компрессоров соответствующей ступени.

Благодаря применению термопрессора достигается уменьшение расхода электроэнергии на получение холода до 4 % и капиталовложений до 6 %.

Термоконденсатор эжектор относиться к контактным теплообменникам. Преимущества такого рода теплообменников в отличии от поверхностных заключаются в следующем:

– сокращение времени теплообмена;
– снижение капитальных и эксплуатационных затрат;
– повышение надежности аппаратов.

А необходимость внедрения и применения термоконденсатора эжектора обусловлена вопросами экологической и пожарной безопасности от испарения в окружающую среду паров легкокипящих углеводородов.

Эжекторный конденсационный фильтр может применяться в системах очистки дымовых газов ТЭЦ. Его преимущества по сравнению с уже существующими фильтрами:

– практически полная моментальная конденсация дымовых газов в системе очистки перед выбросом в атмосферу;

– конденсация достигается путем впрыска мелкодисперсного жидкого хладагента в поток горячих дымовых газов, моментальное охлаждение и конденсация дымовых газов;

– внедрение данного фильтра в уже существующие системы очистки с последующим улучшением степени очистки до 110...115 %.

Литература

1. Когут В. Е., Живица В. И. «Инструкция по методике расчета промежуточного охладителя на основе термопрессора для промышленных холодильных установок» - Одесса. – 1988.
2. Когут В. Е., Живица В. И. «Промежуточный охладитель на основе термопрессора для агрегата АД-260» – Журнал “Холодильная техника” № 6, – Москва. – 1985
3. Когут В. Е., Бутовский Е. Д., Носенко Н. Г. «Проектирование термоконденсатора эжектора» – Журнал «Холодильная техника и технология», №6 (146) – Одесса, – 2013.
4. http://www.engineeringtoolbox.com/
5. Graph “Dew Point Temperature of Flue Gases”
6. «Дымовые газы. Ключ к чистой атмосфере» – Norit Nederland BV,
7. www.norit-ac.com
8. Левушкина Ю.В., Орлов М.Е., Шарапов В.И. «Снижение потерь теплоты с уходящими газами теплогенерирующих установок» – Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы IV рос. науч.-техн. конф., – Ульяновск, – 2003. – с. 121–127
9. К. А. Цой, К. А. Штым «Повышение эффективности работы энергетических котельных агрегатов при сжигании природного газа методом использования скрытой теплоты конденсации водяных паров уходящих газов» – Электронное периодическое издание «Вестник инженерной школы дальневосточного федерального университета», – http:/vestnikfentu.dvfu.ru, – 2012г, – 176-178 стр.