

увеличение доли лома в металлошихте в зависимости от величин теплового КПД нагрева (0,3 и 0,5) может составить, соответственно, $7,3 \div 9,5$ % и $11,2 \div 14,2$ %, где нижние пределы относятся к использованию охлажденного газа, а верхние – высокотемпературного. При уменьшении количества используемого газа и снижении степени его дожигания возможное увеличение доли лома в металлошихте, соответственно, снижается.

В целом же из приведенных результатов расчета следует, что нагрев металлолома конвертерным газом позволяет увеличить долю лома в металлошихте, которая без подогрева составляет максимум $25 \div 30$ %, на $7,3$ – $18,5$ % и обеспечить этим расход лома в конвертерной плавке до $32,3$ – $48,5$ % от массы металлошихты.

Список использованных источников

1. Гичев Ю. А. Взгляд на проблему использования отходящих газов сталеплавильных конвертеров // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2004. – №2(8). – С. 30–36.
2. Бережинский А. И., Циммерман А. Ф. Охлаждение и очистка газов кислородных конвертеров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 272 с.: ил.
3. Баптизманский В. И., Бойченко Б. М., Третьяков Е. В. Металлолом в шихте кислородных конвертеров. – М.: Металлургия, 1982. – 136 с.: ил.

УДК 669.051

В. Г. Голубев, А. С. Колесников

РГП на ПХВ «Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова», г. Шымкент, Республика Казахстан

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Аннотация

На настоящий момент практически отсутствуют исследования процесса гидродинамики течения вязкой суспензии по наружной поверхности вертикальной трубы, однако на практике этот процесс получил естественное распространение. Основанием для разработки послужила необходимость создания конденсаторов поверхностного типа, отвечающих следующим основным требованиям: высокая эффективность устойчивой работы в запыленных парогазовых смесях при низком гидравлическом сопротивлении; обеспечение масштабного перехода; низкая металлоемкость и компактность; возможность самоочистки теплообменной поверхности. Исходными данными для разработки стали результаты анализа работы кожухотрубных конденсаторов, используемых в металлургической и энергетической отраслях Республики Казахстан, основные требования к созданию перспективных

конструкций теплообменного оборудования, фундаментальные методы расчета тепло- и массообмена при конденсации.

Ключевые слова: экспериментальная установка, методика исследования, массообмен, теплообмен, гидродинамика течения вязкой жидкости.

Abstract

Currently almost no studies of the process of hydrodynamics of viscous suspensions on the outer surface of the vertical pipe, but in practice this process was the natural distribution. The basis for the development was the necessity of creation of capacitors surface type that meet the following main requirements: high efficiency of stable work in dusty gas-vapor mixtures with a low hydraulic resistance; provision of a large-scale transition; low metal intensity and compactness, the possibility of self-cleaning heat exchange surface. Baseline data for the development of steel results of work of the shell-and-tube condensers, used in metallurgical and energy sectors of the Republic of Kazakhstan, the basic requirements for development of advanced constructions of heat-exchange equipment, fundamental methods of calculation of heat and mass transfer in condensation.

Keywords: experimental set-up, research methodology, mass transfer, heat transfer, hydrodynamics of a viscous liquid flow.

Практически во всех отраслях промышленности, в том числе и в металлургии необходимы теплообменные аппараты, обладающие таким рядом достоинств, как простота конструкции, надежность работы, незабываемость смолистыми отложениями, низкое гидравлическое сопротивление, развитая поверхность теплообмена, возможность изготовления из неметаллических металлов; компактность, возможность самоочистки теплообменной поверхности можно отнести к новым перспективным теплообменным аппаратам. Однако отсутствие исследований, вернее, их ограниченное количество и методы расчета конструкций кожухотрубных конденсаторов для эксплуатации в запыленных парогазовых смесях препятствует их широкому внедрению в производство. Имеющиеся расчетные и экспериментальные данные не отражают влияние температуры на вязкость стекающего конденсата. При этом одновременно происходит процесс конденсации, то есть охлаждение запыленной парогазовой смеси и стекание полученного конденсата в виде вязкой суспензии по теплообменной поверхности. Таким образом, проблема изучения и расчета теплообменного оборудования для вязких сред является актуальной [1–5].

На разработанной экспериментальной установке была предусмотрена возможность формировать парогазовую смесь с достаточно широким диапазоном изменения содержания конденсирующихся паров и полидисперсной пыли. Исследования проводились в несколько этапов. Были использованы две экспериментальные модели конденсаторов. Одна была выполнена из стекла, что позволяло провести подробное визуальное исследование гидродинамики конденсатной пленки и режимов конденсации. Для детального исследования гидродинамики течения использовали кожухотрубный конденсатор, выполненный из нержавеющей стали. Основные задачи экспериментальных исследований были следующие:

- визуальное исследование гидродинамики пленки конденсата и режимов конденсации;
- определение коэффициентов теплоотдачи при конденсации из парогазовой смеси в зависимости от основных управляющих параметров процесса;

- исследование основных особенностей и закономерностей процесса гидродинамики течения суспензии по поверхности вертикальной трубы;
- определение рабочих параметров процесса в результате обработки данных эксперимента и анализа теоретических результатов;
- разработка инженерных методик и выдача практических рекомендаций.

Схематическое изображение основной экспериментальной установки показано на рис. 1. Установка включала в себя кожухотрубный теплообменник- конденсатор 1, испаритель 2, газоподогреватель 3, приборы для измерения расхода газа и воды 4, камеру смешения 5, пылеподатчик 6, напорный бак 7, насос для циркуляции хладагента 8, сливной бак 9, поглотительные бачки 10, вакуум-насос 11, а также запорную арматуру, нагревательные элементы, контрольно-измерительные приборы и схему автоматического контроля температуры.

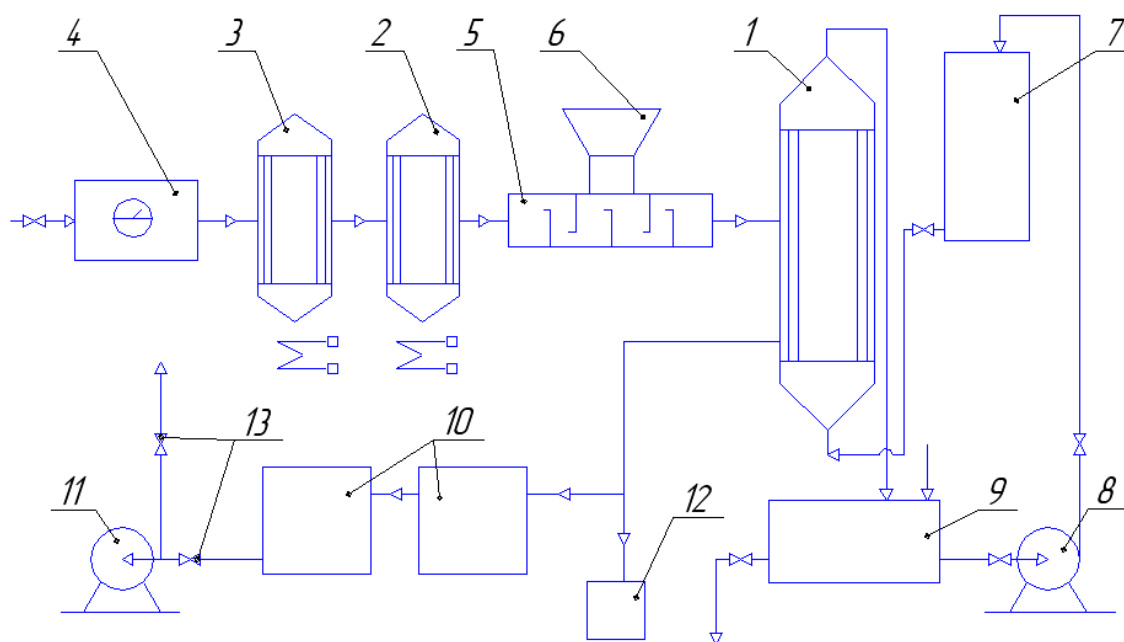


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Основным узлом установки является конденсатор, представляющий собой теплообменник типа «труба в трубе», состоящий из двух коаксиально расположенных трубок. Для изготовления внутренних трубок использовали нержавеющую сталь X18H10T, а также простая сталь Ст.3. Конденсатор №1 был цилиндрической формы с габаритными размерами 53 x 500 мм. Он был изготовлен из нержавеющей стали X18H10T. Внутренняя трубка диаметром 15 мм с толщиной стенки 10 мм закреплялась с помощью сварки к корпусу. В корпусе были предусмотрены два смотровых окна, расположенных диаметрально, что позволяло контролировать наличие пленки конденсата, наблюдать режимы ее течения и измерять толщину. Конденсатор №2 также был изготовлен из нержавеющей стали X18H10T. Внутренняя трубка диаметром 53 мм с толщиной стенки 1,5 мм и длиной 1000 мм закреплялась в корпусе с помощью фланцевых соединений. Была предусмотрена также возможность установки взамен одиночной трубки трубного пучка из 15 труб диаметром 10 мм с толщиной стенки 1,0 мм. Конденсатор №3 с габаритными размерами 52 x 500 мм изготовлялся из термически стойкого стекла и предусматривал установку различных сменных внутренних трубок из нержаве-

ющей стали X18H10T диаметрами; 10 мм; 16 мм; 28 мм; 50 мм с толщиной стенки 0,5 мм, и длиной 500 мм. Были исследованы также несколько трубок из простой стали Ст.3: диаметрами 16 мм; 47 мм, длиной 500 мм. В качестве неконденсирующегося компонента парогазовой смеси в экспериментальных исследованиях использовали осушенный воздух. В качестве конденсирующихся компонентов исследовали пары воды и глицерина. Свойства этих веществ и их пары существенно различаются по физическим свойствам. Глицерин является модельным веществом при исследовании течения конденсатных пленок с вязкостью, сильно зависящей от температуры и меняющейся в широком диапазоне. Кроме того, сильно различаются также температурные диапазоны процессов конденсации воды и глицерина. Исследование процесса конденсации именно этих паров позволяет проверить теоретические положения, т. к. может протекать в разных гидродинамических и тепловых режимах. Запуск установки и ее работа производилась в следующей последовательности: охлаждающая вода, температура которой устанавливается в нужных пределах с помощью специальных электронагревателей, из напорного бака подавалась во внутреннюю трубу конденсатора 1. После стабилизации температурного режима производились замеры температуры воды на входе и выходе из конденсатора с помощью термопар типа ХК. Неконденсирующийся газ–воздух подавали на смешение с паром с помощью вакуум-насоса 11 типа РМК- 4 через газовый счетчик 4 типа СГ-5. Затем газ поступал в нагреватель 2, оснащенный регулируемой электрической спиралью. Затем нагретый газ поступал в испаритель 3, который был также снабжен регулируемой электроспиралью. Затем в камере смешения 5 производилось смешивание паров исследуемого вещества и воздуха. В камеру смешения подавалась также пылеподатчиком 6 подогретая пыль. Полученная запыленная парогазовая смесь поступала в экспериментальный конденсатор 1. Контрольно-измерительная схема позволяла обеспечить стабильный тепловой режим работы основных узлов установки путем автоматического регулирования рабочих температур газа, смеси паров и охлаждающей воды. Для исключения конденсации паров на внутренней поверхности корпуса конденсатора и в подводящих магистралях была предусмотрена их теплоизоляция и подогрев. Особенностью процесса конденсации паров из запыленных парогазовых смесей является нестабильность многих параметров в ходе процесса. Поэтому установка режима работы производилась в следующей последовательности. Сначала осуществляли разогрев рабочей жидкости в испарителе заданного значения. Затем включали вакуум-насос, в результате чего температура и давление пара резко снижались. После устранения рабочего режима установки начинали производить измерения. После изменения одного из параметров процесса ждали выхода на установившийся режим. Затем производили новые измерения. Температура парогазовой смеси на входе в конденсатор 1 с помощью регулируемого электрического обогрева на успокоительном участке поддерживалась равной температуре точки росы. Пары исследуемого вещества конденсировались на наружной поверхности охлаждающей трубы, и жидкий конденсат сливался в специальный мерник с делениями. В отдельный сборник отводили ту долю конденсата, которая конденсируется на внутренней стенке корпуса. Неконденсирующийся газ и пар отсасывались вакуум-насосом 11 через два поглотительных бачка 10, заполненных водой.

Все использовавшиеся для измерения температуры термопары были изготовлены из материала хромель и капель диаметром 0,15 мм, термопары тарировали по показаниям образцовых ртутных термометров с ценой деления 0,10 °С. ЭДС термопар измеряли самозаписывающим прибором КСП-4 и контролировали лабораторным потенциометром ПП-63 клас-

са 0,05. Применявшиеся для измерения температур ртутные термометры типа ТЛ-1 имели цену деления 0,1 °С. В ходе эксперимента определяли температуру стенки охлаждающей трубы с помощью хромель-копелевых термопар, установленных по три штуки в каждом из трех сечений по высоте трубы. Термопары в сечении устанавливали под углом 120 град. относительно друг друга. По высоте конденсатора в ядре газового потока определяли температуру смеси с помощью пяти ртутных термометров, установленных на расстоянии 10 мм друг от друга. Расход охлаждающей воды контролировали предварительно оттарированным ротаметром РС-5. Температуру и толщину слоя образующегося конденсата измеряли с помощью термопар, установленных по высоте аппарата на микрометрических устройствах, пропущенных через сальниковые уплотнения. Цена деления этих устройств составляла 0,001 мм. Толщина пленки определялась как по температурному перепаду на границе раздела парогазовой смеси и конденсатной пленки, так и методом электроконтактной иглы. С помощью ртутных дифференциальных манометров контролировали давление в следующих точках: перед вакуум-насосом; в испарителе; в конденсаторе. С целью определения теплового баланса контролировали также показания амперметра, вольтметра, установленных в электрической цепи электронагревателей газа, испарителя и напорного бака для охлаждающей воды.

В экспериментах использовали пыль, отобранную из второго электрофильтра в системе конденсации фосфора. Подачу пыли в бачок парогазовой смеси осуществляли пылеподатчиком 6 в конденсатор 1. При подаче запыленной парогазовой смеси определяли массу и ее количество пыли по ступеням установки путем взвешивания после выпаривания конденсата отдельно в конденсаторе, отдельно в сепараторе и в жидкости после промывки конденсатора. С целью предотвращения накопления пыли в конденсаторе аппарат после каждого опыта промывали 2 %-ным щелочным раствором NaOH и дистиллированной водой. В опытах без пыли наружная поверхность теплообменной трубы в конденсаторе обрабатывалась соляной кислотой, затем дихлорэтаном, а потом промывалась дистиллированной водой. В опытах с глицерином пыль отделяли от жидкости с помощью принудительной фильтрации посредством вакуум-насоса. Фильтрация считалась законченной, когда в отфильтрованном глицерине количество оставшейся пыли составляло не более одной тысячной доли грамма, т. е. примерно около 0,05–1 % от всей массы пыли в отобранной пробе. взвешивание осуществляли на весах типа ВЛК-500г-М. Физические свойства воды и глицерина определяли по справочным данным.

Методика определения температуры насыщения исследуемых паров в опытном конденсаторе была следующей:

1. Добивались в испарителе стабильной температуры испаряемой жидкости.
2. Экспериментальным путем определяли количество пара, образуемого в единицу

времени: а) масса пара; б) объем пара $V_p = \frac{m_p}{\rho_p}$.

3. Определяли объем неконденсирующегося газа–воздуха по ротаметру за время τ : V_g .

4. Определяли объемную концентрацию полученного пара по формуле: $Y_p = \frac{V_p}{V_g + V_p}$

5. Определяли парциальное давление пара: $P_p = P_c \frac{V_p}{V_g + V_p} = P_c y_p$, где P_c – давление

на входе в конденсатор.

По таблице равновесного давления пара определяли температуру насыщения или конденсации.

6. Массу поступающего в установку газа рассчитывали по объему, определенному ротаметром: $G_g = V_g \rho_g$, где ρ_g – плотность газа при температуре входа в ротаметр.

7. По количеству конденсата, сконденсировавшегося за данное время в конденсаторе G_c , и количеству паров G_0 , поданных в аппарат за это время, определяли степень конденсации: $\eta = \frac{G_c}{G_0}$.

8. Общую массу паров исследуемого вещества, уловленного в установке, определяли суммированием количества конденсата в конденсаторе G_c и поглотительных бачках-сепараторах G_s : $G_{01} = G_c + G_s$.

9. Относительные потери паров исследуемого вещества определялись по выражению: $\Pi_0 = \frac{G_0 - G_{01}}{G_b}$, где G_b – количество паров на выходе из конденсатора. Эта характеристика определялась весовым способом по улавливанию на второй ступени сепаратора.

10. Относительный подсос воздуха в установку из окружающей среды определяли следующим образом: $\Pi = \frac{G_g}{G_{g0}}$, где G_{g0} – масса газа, проходящего через контрольный ротаметр на выходе из экспериментальной установки за то же время, за которое определяли G_c , т. е. $G_{g0} = V_{g0} \rho_g$.

11. Запыленность смеси на входе в конденсатор вычисляли следующим образом: $g_p = \frac{G_p}{V_g + V_p}$, где G_p – масса пыли, подаваемой за данное время пылеподатчиком. Изменяя производительность пылеподатчика путем регулирования количества оборотов подающего шнека, получали различную запыленность смеси на входе в конденсатор.

12. Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке рассчитывали по формуле: $\alpha_m = \frac{q}{T_s - T_w}$, где $q = \frac{Q}{F}$ – удельный тепловой поток. Здесь: $Q = \frac{C_p G_B \Delta T_{BWB}}{\Delta t}$, где G_B – расход охлаждающей воды; F – наружная поверхность охлаждающей трубки; ΔT_{BWB} – разность температур воды на входе и выходе из конденсатора; Δt – время опыта.

Таким образом, проведенные предварительные исследования показали работоспособность установки и результативность полученных данных, а также позволили разработать дальнейшую программу действий.

Список использованных источников

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. 659 с.
2. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники. – Л.: Госхимиздат, 1961. 368 с.

3. Colburn A. P., Hougen O. A. Dialign of cooler condensers for mixtures of vapors with noncondensing gases // Ind. and Engn. Chem. – 1934. – V. 26, No 11. Pp. 1178–1182.

4. Golubev V. G., Brenner A. M., Balabekov O. S. Heat and mass transfer under the film condensation from vapourgas-dust mixtures // Adv. Comp. Meth. In Heat Transfer VII. – Southampton, UK, Boston, USA. 2002. – P. 233–243.

5. Голубев В. Г., Бренер А. М. Особенности пленочной конденсации из запыленной парогазовой смеси // Теор. основы хим. технол. – 2002. – Т. 36, № 2. – С. 141–146.

УДК 669.045

В. Г. Голубев, А. С. Колесников

РГП на ПХВ «Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова», г. Шымкент, Республика Казахстан

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ ИЗ ЗАПЫЛЕННОЙ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Аннотация

В настоящей статье приведены экспериментальные исследования процесса теплообмена и гидродинамики при конденсации паров из запыленной паровой смеси, приведен анализ исследования особенностей конденсации паров из запыленных парогазовых смесей. Полученные результаты проведенных опытов показали, что запыленность наиболее резко снижает коэффициент теплоотдачи в верхней точке вертикально расположенного конденсатора, а по мере удаления от верхней точки влияние запыленности на коэффициент теплоотдачи способствовало уменьшению, ввиду того, что падает тепловая нагрузка и температура смеси. Проведенные опыты показали, что для смеси паров воды с воздухом рабочим диапазоном является температурный перепад порядка 30–50 К. А возрастание начального объемного содержания паров от 0,1 до 0,9 приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи от 50 до 140 Вт/м²К, при возрастании содержания паров в парогазовой смеси от 0,3 до 0,9 увеличивается коэффициент массоотдачи в смеси от $1,2 \cdot 10^{-9}$ кг/м² Па до $7,5 \cdot 10^{-9}$ кг/м² Па.

Ключевые слова: конденсация паров, запыленная парогазовая смесь, теплообмен, гидродинамика.

Abstract

In this article summarizes the experimental research of process of heat exchange and hydrodynamics in the condensation of vapors from the dusty steam mix, an analysis of the research on the features of vapor condensation of dusty gas-vapor mixtures. The results of the experiments have shown that dust is most sharply reduces the heat transfer coefficient at the top point of a vertically positioned condenser, and as the distance from the top point, the impact of dust on the heat transfer coefficient contributed to reducing, in view of the fact that drops the heat load and the temperature of the mixture. The tests showed that for a mixture of water vapors with air of the working range of