

УДК 629.7.036.3

І.І. Петухов, О.Ю. Лисиця, М.С. Гуманов

ДО ПИТАННЯ УТВОРЕННЯ КОНДЕНСОВАНОЇ ФАЗИ ПРИ НАГРІВАННІ КРІОГЕННИХ РІДИН У РЕКУПЕРАТОРАХ

Процес перенесення теплоти при контакті парогазової суміші (вологе повітря, продукти згоряння, тощо) з холодними поверхнями рекуперативних теплообмінників може супроводжуватися випаданням на них конденсованої фази. Інтенсивність, склад та агрегатний стан конденсованої фази в цьому процесі залежать від багатьох факторів. У разі нагрівання рідкого водню чи, тим більше, гелію їх кількість і можливий діапазон зміни максимальні. Наявність інію, льоду чи рідкої плівки на поверхні рекуператора може суттєво впливати на режим його роботи. При цьому збільшується шорсткість та термічний опір стінки, зменшується живий переріз для потоку парогазової суміші. В окремих випадках кристали твердої фази можуть пошкодити елементи конструкції. На сьогодні питання утворення конденсованої фази та обледеніння поверхонь при нагріванні кріогенних рідин вивчені недостатньо і потребують подальшого дослідження, у тому числі в напрямку удосконалення моделі.

В даній роботі модель процесу передбачає, що на зовнішній стінці рекуператора знаходиться багатокомпонентний шар твердої фази в зоні температур нижче температури плавлення будь якого з дифузних компонентів і рідка плівка при більш високій температурі. Структура та склад шару твердої фази визначається інтенсивністю процесів переносу компонентів суміші до поверхні фазового переходу та температурою на цій поверхні. З ростом товщини шару підвищується і температура поверхні. Тому процес десублімації відповідного компонента завершується, коли вона зростає до температури його плавлення. Далі продовжують кристалізуватися компоненти з більш високою температурою потрійної точки та формується рідка плівка.

Товщина плівки визначається адгезійними властивостями середовищ та в'язкістю рідини, а також силами тяжіння та зсуву на межі розділу з потоком газової суміші. Температура

на цій межі визначається з рівняння теплового балансу, яке базується на тому, що алгебраїчна сума теплопритоків до міжфазної поверхні дорівнює теплоті, яка витрачається на фазовий перехід. Відведена теплота визначається термічним опором шару твердої фази та стінки при граничних умовах 3-го роду на її внутрішній стороні. При цьому розглядається вплив пористості на термічний опір шару багатокомпонентної твердої фази.

Теплота до міжфазної поверхні переноситься випромінюванням, конвекцією та за рахунок теплоти фазового переходу потоку маси компонентів, що дифундують. Основними з них є вода, азот, кисень та (у разі вуглеводневих палив) вуглецевий газ. При розрахунку коефіцієнта масовіддачі з урахуванням аналогії процесів тепло- і масопереносу використовуються критеріальні рівняння, подібні до конвективного теплообміну, але розраховуються дифузійні числа Нуссельта (числа Шервуда) і дифузійні числа Прандтля (числа Шмідта).

Для нестационарного процесу зростання товщини шару твердої фази температура міжфазної поверхні змінюється. При виходу на стаціонарний режим вона дорівнює температурі танення водяного льоду. Тепловий потік з боку суміші визначається цілком однозначно, включаючи дифузійну складову. Далі за відомої температури кріорідини розраховується загальний термічний опір і потім – максимальна товщина льоду на стінці.

Розроблена модель утворення конденсованої фази та її кристалізації на холодних стінках рекуператорів при нагріванні кріогенних рідин дозволяє врахувати усі значущі фактори процесу, визначити коефіцієнти теплопередачі в умовах обмерзання поверхонь теплообміну, тривалість перехідних процесів в теплообмінниках та максимальну товщину шару льоду при заданих параметрах гріючого та кріогенного потоків.