

Автореферат
СЗ7

проф. Гушану И.В.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

СИМСИ Нивусон Жаки Роза

УДК 621.57

ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ
ЭФФЕКТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЗ В СОСЛАХ

Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты холодильной
и криогенной техники и систем кондиционирования

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

xv 995

Институт холода
ОНАХТ
Бібліотека

г. Одесса - 1986

Практическая ценность работы определяется тем, что в ней разработаны методы расчета и проектирования холодильных машин, использующих эффект температурного разделения фаз в сопле.

Апробация работы. Основные результаты работы должны на международной научной конференции молодых ученых и выпускников ОТИХП – граждан зарубежных стран в 1984 году, на 54-й и 55-й отчетных научных конференциях ОТИХП в 1985 и 1986 г.г. По теме диссертации опубликованы две статьи.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 150 стр. машинописного текста, иллюстрируется 91 рисунком, содержит 12 таблиц и состоит из введения, 4 глав, выводов, списка использованной литературы из 121 наименования и 2 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и сформулированы научные положения диссертации, защищаемые автором.

В первой главе выполнен анализ работ по холодильным машинам на основе эффекта температурного разделения фаз в соплах.

Разнообразные физические эффекты, обнаруживаемые при совместном течении газа с мелкодисперсной жидкой или твердой фазой, привлекают все большее внимание к изучению и анализу двухфазных течений в соплах. Благодаря простоте конструкции, возможности создания больших градиентов давления и появлению ряда необычных эффектов, сопровождающих течение, сопла с двухфазными потоками могут найти применение во многих областях техники. Одним из таких необычных эффектов является эффект температурного разделения фаз, представляющий значительный интерес для холодильной техники.

Установлено, что при расширении в сопле воздуха с мелкодисперсными каплями воды температура торможения воды значительно понижается и при соответствующем начальном давлении воздуха возможно появление снега на выходе из сопла. На этом явлении основано действие так называемых "снеговых пушек", конструкция которых описана в патентах Барета, Торенса, Страбла и др. В "снеговых пушках" струя сжатого воздуха производит диспергирование подаваемой в устройство воды, а затем смесь воздуха с мелкодисперсными частицами воды расширяется в сопле и вытекает в атмосферу, где происходит торможение фаз. В результате процесса расширения в сопле и последующего торможения на выходе по-

лучается искусственный снег. При теплообмене частиц с атмосферным холодным воздухом происходит их дополнительное охлаждение и замораживание.

В работе А.А.Столярова произведено исследование расширения в сопле смеси воздуха с водой, керосином и водяным раствором диэтиленгликоля при начальных давлениях 0,3–2,0 МПа. На выходе из сопла устанавливается сепаратор, в котором происходило разделение фаз. При этом наблюдалось появление снега в сепараторе, если в сопло подавалась смесь воздуха с водой, а керосин и раствор диэтиленгликоля охлаждались до температуры ниже 0°C.

В опытах И.А.Чарного, В.М.Шляховецкого, Ю.С.Беззаботова и др. мелкодисперсные частицы воды вводились в поток воздуха, расширяющийся в сопле. После отделения воды от воздуха она имела температуру, более низкую, чем первоначальная, а в опытах И.А.Чарного с сотрудниками наблюдалось замерзание воды. Этот принцип охлаждения положен в основу разработанных В.М.Шляховецким и Ю.С.Беззаботовым газодинамических холодильных машин.

Описанию процессов, происходящих в двухфазных потоках, посвящены многие десятки работ. Однако в них отсутствует достаточно строгое объяснение эффекта понижения температуры торможения воды и других веществ в соплах, наблюдавшееся в экспериментах. По этой причине возможно сформулировать такие задачи работы:

- 1) выявить физическую сущность эффекта температурного разделения фаз;
- 2) выполнять термодинамический анализ эффекта при равновесном течении в сопле;
- 3) проанализировать эффект при неравновесном течении двухфазной среды в сопле и сопоставить теоретические данные с экспериментальными;
- 4) разработать методы профилирования сопла, обеспечивающие высокую эффективность охлаждения;
- 5) разработать методику расчета холодильных машин, использующих эффект.

Во второй главе произведен термодинамический анализ эффекта температурного разделения фаз. Пусть газожидкостная смесь на входе в сопло имеет температуру T_1 , скорость W_1 , давление P_1 и после расширения в сопле обе фазы приобретают одинаковую статическую (термодинамическую) температуру T_2 , скорость W_2 , давление P_2 . Для такого равновесного течения осуществим мысленный эксперимент. Разделим обе

фазы и после этого каждую фазу затормозим. Температуры торможения определяются соотношениями:

$$(T_{a2})_0 = T_2 + \frac{w_2^2}{2 c_{pa}} ; \quad (1)$$

$$(T_{b2})_0 = T_2 + \frac{w_2^2}{2 c_{pb}} ; \quad (2)$$

где $(T_{a2})_0$, $(T_{b2})_0$ - температуры торможения газа и жидкой фазы, соответственно; c_{pa} , c_{pb} - теплоемкость газа и жидкой фазы, соответственно.

При выводе уравнений (1) и (2) предполагали, что теплоемкости постоянны и торможение жидкости происходит при условиях, близких к изобарным. Из этих уравнений видно, что при $c_{pa} = c_{pb}$ температура торможения газа отличается от температуры торможения жидкости, если обе фазы не успевают термически взаимодействовать при торможении. В этом и заключается физическая сущность эффекта температурного разделения фаз.

Для количественного описания эффекта принимаем, что во-первых, в конечных сечениях сопла обе фазы имеют одинаковую термодинамическую температуру и одинаковую скорость; во-вторых, течение адиабатно; в-третьих, можно пренебречь испарением и конденсацией фаз. Тогда уравнение первого начала для потока в сопле можно представить в форме:

$$G_a i_{a1} + G_b i_{b1} = G_a \left(i_{a2} + \frac{w_2^2}{2} \right) + G_b \left(i_{b2} + \frac{w_2^2}{2} \right) ; \quad (3)$$

где обозначено: G - массовый расход, i - энтальпия, w - скорость; индексы: а - газ, в - жидкость, 1 - начальное состояние на входе в сопло, 2 - конечное состояние на выходе из сопла; принято, что $w_1 = 0$.

Энтальпии торможения фаз на выходе из сопла определяются как

$$(i_{a2})_0 = i_{a2} + \frac{w_2^2}{2} ; \quad (4)$$

$$(i_{b2})_0 = i_{b2} + \frac{w_2^2}{2} . \quad (5)$$

Из уравнения (3) можно определить кинетическую энергию фаз на выходе из сопла:

$$\frac{w_2^2}{2} = \frac{G_a (i_{a1} - i_{a2}) + G_b (i_{b1} - i_{b2})}{G_a + G_b} . \quad (6)$$

После постановки выражения (6) в (4) и (5) получаем:

$$(i_{a2})_0 - i_{a1} = (1 - \xi) [(i_{a2} - i_{a1}) + (i_{b1} - i_{b2})] ; \quad (7)$$

$$(i_{b2})_0 - i_{b1} = \xi [(i_{a1} - i_{a2}) + (i_{b2} - i_{b1})] ; \quad (8)$$

где $\xi = \frac{G_a}{G_a + G_b}$ - относительная массовая доля газа в смеси.

При расширении в сопле всегда $i_{a1} - i_{a2} > 0$.

Поэтому при рассматриваемом равновесном течении общее условие охлаждения фазы "в" в результате эффекта температурного разделения фаз можно представить в виде неравенства:

$$i_{b1} - i_{b2} > i_{a1} - i_{a2} > 0 . \quad (9)$$

Формулы (7), (8), (9) справедливы при любом агрегатном состоянии фазы в. При этом знаки разностей энтальпий $(i_{a2})_0 - i_{a1}$ и $(i_{b2})_0 - i_{b1}$ противоположны. Таким образом, эффект температурного разделения фаз проявляется в уменьшении энтальпии торможения одной фазы и в одновременном увеличении энтальпии торможения другой фазы.

Применим уравнения (7) и (8) к уже рассмотренному случаю, когда фазы а и в имеют постоянные теплоемкости, а удельный объем v_p фазы в мал. Тогда эффект температурного разделения фаз описывается соотношениями - следствием уравнений (7) и (8):

$$(T_{a2})_0 - T_1 = (1 - \xi)(T_1 - T_2) \left(\frac{c_{pa}}{c_p} - 1 \right) ; \quad (10)$$

$$(T_{b2})_0 - T_1 = \xi (T_1 - T_2) \left(\frac{c_{pb}}{c_p} - 1 \right) . \quad (11)$$

В опытах А.А. Стоярова по расширению двухфазных струй воздуха с мелкодисперсными частицами воды, керосина и водных растворов диэтилгликоля $\frac{c_{pa}}{c_p} > 1$. При этом, в соответствии с формулами (10) и (11) температура торможения частиц понижается, а температура торможения воздуха повышается.

Прандтля; C_D - коэффициент сопротивления частицы; α, β - коэффициенты пропорциональности скорости.

Уравнения (13) - (17) образуют нелинейную систему. Поэтому были получены аналитические решения системы для модельного случая, когда числа Re малы ($C_D = 24/Re$, $Nu = 2$), так что $A = const$, $D = const$, а скорости w_a и w_g - линейные функции координаты: $w_a = \alpha x$, $w_g = \beta x$.

Уравнение (16) интегрировали методом возмущений.

Эти же аналитические решения применимы и к случаю, когда $Re \gg 1$ но $A = const$ и $D = const$; при этом входящие в них параметры принимают значения, средние для потока.

Анализ полученных решений позволил выявить физические условия возникновения в сопле эффекта температурного разделения фаз. Возможны такие случаи (обозначено $k = \frac{w_g}{w_a} = \frac{\beta}{\alpha}$):

1) жидкая (твердая) фаза нагревается, а газ охлаждается в следующих случаях:

$$1a) c_{pa}/c_g > 1 \quad \text{при} \quad Pr_a \gg \frac{2}{3}, \quad k < 1;$$

$$1б) c_{pa}/c_g < 1 \quad \text{при} \quad Pr_a > \frac{2}{3}, \quad k < k_0;$$

$$1в) c_{pa}/c_g = 1 \quad \text{при} \quad Pr_a > \frac{2}{3}, \quad k < 1;$$

$$1г) c_{pa}/c_g > 1 \quad \text{при} \quad \text{любом значении } Pr_a,$$

$$k = 1 \quad (\text{равновесное течение});$$

2) жидкая (твердая) фаза охлаждается, а газ нагревается в следующих случаях:

$$2a) c_{pa}/c_g < 1 \quad \text{при} \quad Pr_a > \frac{2}{3}, \quad k_0 < k < 1;$$

$$2б) c_{pa}/c_g < 1 \quad \text{при} \quad \text{любом } Pr_a,$$

$$k = 1 \quad (\text{равновесное течение});$$

3) температуры торможения фаз одинаковы - эффекта температурного разделения нет, если

$$3a) c_{pa}/c_g = 1 \quad \text{при} \quad Pr_a = \frac{2}{3} \quad \text{и} \quad \text{любом } k < 1;$$

$$3б) c_{pa}/c_g = 1 \quad \text{при} \quad \text{любом } Pr_a, \\ k = 1 \quad (\text{равновесное течение});$$

$$3в) c_{pa} \neq c_g, \quad Pr_a \neq \frac{2}{3}, \quad k = k_0.$$

Здесь величина

$$k_0 = \frac{2 - 3 Pr_a}{\frac{c_{pa}}{c_g} + 1 - 3 Pr_a} \quad (18)$$

соответствует точке инверсии.

Полученные теоретические результаты были сопоставлены с экспериментальными данными А.А.Столярова, Н.В.Пашацкого, Н.И.Сиромятникова. Было показано, что теоретические данные хорошо согласуются с результатами эксперимента.

Была рассмотрена система уравнений, определяющих неравновесное двухскоростное и двухтемпературное движение двухфазной среды для случая, когда происходит затвердевание жидких частиц в потоке. Определены функции, описывающие распределение скоростей, температур и давления потока.

На основе полученных аналитических решений найдены максимально возможные размеры частиц, при которых еще возможен эффект температурного разделения фаз, длина и профиль сопла, обеспечивающие достаточно высокую эффективность разделения фаз по температурам торможения.

В четвертой главе рассмотрены холодильные машины на основе эффекта температурного разделения фаз в сопле. Такие машины могут выполняться по открытой и закрытой схемам. Интерес представляет схема машины для производства льда с рециркуляцией холодной воды. Для регулирования характеристик сопла в зависимости от расхода целесообразно использовать применяемые в других областях техники газодинамические способы регулирования со вспомогательным дополнительным газовым потоком.

Для оценки эффективности охлаждающих устройств на основе эффекта температурного разделения фаз использован эксергетический метод. При этом определяем отдельно эксергию фазы, температура торможения которой в сопле понизилась, эксергию фазы, температура торможения которой в сопле повысилась, и подведенную к соплу эксергию потока. После этого вычислили эксергетические к.п.д. охлаждающего устройства для двух случаев: в первом эксергия нагреваемой фазы не используется, а во втором эта эксергия используется.

Эти расчеты проведены для различных случаев охлаждения и замораживания.

Обозначим через $(\eta_{\text{э}})_{\text{хол}}$ эксергетический к.п.д. охлаждающего устройства на основе эффекте температурного разделения фаз в случае, когда эксергия нагретой фазы не используется, а через $(\eta_{\text{э}})_{\text{общ}}$ эксергетический к.п.д., учитывающий эксергию нагретой фазы.

Для рабочей смеси вода-воздух наибольший эксергетический к.п.д. $(\eta_{\text{э}})_{\text{хол}} = 0,047$ соответствует отношению давлений 3,75 и значению $\xi = 0,875$. При этом $(\eta_{\text{э}})_{\text{общ}} = 0,087$. Таким образом, почти половину эксергии в этом случае содержит нагретый поток воздуха. При больших отношениях давлений и том же значении ξ величина $(\eta_{\text{э}})_{\text{хол}}$ уменьшается до 0,025, а $(\eta_{\text{э}})_{\text{общ}}$ уменьшается до 0,06. При других значениях ξ максимальные значения $(\eta_{\text{э}})_{\text{хол}}$ меньше, чем при $\xi = 0,875$, но значения $(\eta_{\text{э}})_{\text{общ}}$ достигают 0,12.

Исследовалось влияние отношения теплоемкостей c_p/c_{pa} на значения $(\eta_{\text{э}})_{\text{хол}}$ и $(\eta_{\text{э}})_{\text{общ}}$ для двухфазной смеси воздух и жидкость (твердое тело), не изменяющая агрегатного состояния, $\xi = 0,74$. При равенстве $c_p = c_{pa}$ эффекта температурного разделения фаз нет и эксергетические к.п.д. равны нулю. С увеличением отношения теплоемкостей c_p/c_{pa} эксергетические к.п.д. монотонно возрастают, достигая при $\frac{c_p}{c_{pa}} = 4,5$ значений $(\eta_{\text{э}})_{\text{хол}} = 0,05$ и $(\eta_{\text{э}})_{\text{общ}} = 0,14$.

Было произведено сопоставление характеристик исследуемого охлаждающего устройства с газодинамическими охладителями, в которых охлаждаемая жидкость вводится в расширившийся поток после сопла. У таких охладителей холодильный коэффициент в 3-4 раза ниже, чем у исследованных устройств. Сопоставление производилось при одинаковых отношениях давлений.

По результатам теоретического исследования были разработаны две методики расчета холодильных машин, использующих эффект температурного разделения фаз в сопле. Первая методика основывается на теоретических формулах второй главы и позволяет производить расчет любых схем холодильных машин. Этого типа, если предварительно известны значения скоростного коэффициента сопла.

Вторая методика использует аналитические решения дифференциальных уравнений двухскоростной и двухтемпературной модели течения.

Она применима к устройствам, в которых не происходит затвердевание фазы В. Она позволяет определить допустимые размеры частиц, длину сопла и параметры торможения фаз, если известны соотношения для коэффициентов теплообмена и сопротивления частиц, обтекаемых газом.

Были произведены расчеты по сопоставлению характеристик холодильных машин, построенных по различным схемам и предназначенных для производства 500 кг/час водного льда. Оказалось, что при расширении до атмосферного давления начальное давление в воздушной холодильной машине с детандером равно 0,208 мПа, в машине, использующей эффект температурного разделения фаз, начальное давление составляет 0,270 мПа, а в машине с вихревой трубой - 0,79 мПа. Потребляемая мощность воздушной холодильной машины с детандером равна 77 квт, машины, использующей эффект температурного разделения фаз - 130 квт, а машины с вихревой трубой - 312 квт. Потребляемая мощность парокomppressorной холодильной машины для этих же условий равна, примерно, 35 квт. Сопоставление по потребляемой мощности, естественно, не является исчерпывающим. Необходимо также учесть, что машины на основе эффекта температурного разделения фаз обладают предельно простой конструкцией, содержат минимальное число конструктивных элементов, у них всего один теплообменный аппарат - конденсатор холодильника, включенный после компрессора, эти машины используют безопасный и доступный хладагент, для них характерны низкие давления в тракте. Все эти соображения необходимо учитывать при определении областей рационального применения таких холодильных машин.

ВЫВОДЫ:

1. Использование эффекта температурного разделения фаз в двухфазных потоках создает возможность создания простых по конструкции и достаточно эффективных воздушных и газовых холодильных машин.
2. Разработанный термодинамический метод расчета эффекта температурного разделения фаз обладает достаточной точностью и образует основу для термодинамических расчетов циклов и схем воздушных и газовых холодильных машин на основе этого эффекта.
3. Методы расчета эффекта температурного разделения фаз, основанные на аналитических решениях дифференциальных уравнений двухтемпературной и двухскоростной модели течения, позволяют обоснованно

выбрать степень дисперсности жидкой (твердой) фазы и размеры сопла.

4. Произведенный эксергетический анализ эффекта температурного разделения фаз позволяет оптимизировать характеристики исследуемых холодильных машин и обосновать выбор рабочих веществ.

5. Исследование характеристик холодильных машин с рециркуляцией жидкости показывает целесообразность снижения первоначальной температуры торможения двухфазного потока с целью повышения эффективности охлаждающего устройства.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Шнайд И.М., Симон Н.Д., Термодинамический анализ эффекта температурного разделения двухфазной струи, - Межведомственный сборник "Холодильная техника и технология", 1985 г., вып. № 41, с.1-7.

2. Шнайд И.М., Симон Н.Д., Расчет эффекта температурного разделения двухфазной струи при затвердевании жидкой фазы, - Межведомственный сборник "Холодильная техника и технология", 1986 г., вып. № 43, с.7-10.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

T - температура; W - скорость; p - давление; C_{pa}, C_g - теплоемкость газа и жидкой фазы, соответственно; G - массовый расход; U - энтальпия; ξ - относительная массовая доля газа в смеси; φ - скоростной коэффициент сопла; s - удельная энтропия; r_g - радиус частицы; A, D - параметр сопротивления и теплообмена, соответственно; ρ - плотность; X - координата; Γ - коэффициент восстановления температуры; λ - теплопроводность; R_a - газовая постоянная фазы "а"; C_p - постоянная; Nu, Re, Pr - числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля, соответственно; C_D - коэффициент сопротивления частиц; α, β - коэффициенты пропорциональности скорости; k - отношение скоростей жидкой и газообразной фаз; k_0 - параметр точки инверсии, $(\eta_2)_{хол}, (\eta_2)_{гор}, (\eta_2)_{общ}$ - эксергетические КПД холодного, горячего потока и общий эксергетический КПД устройства.

Индексы: a - газ; l - жидкость; I - начальное состояние на входе в сопло; 2 - конечное состояние на выходе из сопла; 0 - состояние после торможения; S - параметры потока при обратимом изэнтропном расширении.

Ротапринт ОТИХП г.Одесса зак 618-86 тираж 100
объем 1,0 п.л.

xv 995
Інститут холода
ОНАХТ
бібліотека