

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАТНОГО РАСШИРЕНИЯ АММИАКА В ТИХОХОДНОЙ ПОРШНЕВОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ. ЧАСТЬ 2

Д. Х. Садвакасов, Г. И. Чернов, В. Л. Юша

Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

**В работе представлен анализ влияния методики расчета коэффициента теплоотдачи на математическое моделирование процесса обратного расширения аммиака в рабочей камере поршневой компрессорной ступени (в области влажного пара). Рассмотрены альтернативные варианты пленочной и каплевой схематизации процесса теплообмена. В основу математической модели легли уравнения первого закона термодинамики для тела переменной массы, уравнение состояния реального газа, уравнения Клапейрона–Клаузиуса и Ньютона–Рихмана. По результатам расчетно-параметрического анализа проведена оценка применимости известных методик расчета коэффициента теплоотдачи к рассматриваемому объекту.**

**Ключевые слова:** аммиак, влажный пар, перегретый пар, процесс обратного расширения, математическая модель, коэффициент теплоотдачи, пленочная схематизация, каплевая схематизация.

## Введение

Как было показано ранее [1], изменение агрегатного состояния рабочего тела в проточной части энергетических и технологических аппаратов и агрегатов характерно для широкого спектра оборудования; при этом в некоторых случаях возможна реализация совмещенных процессов обратного расширения, кипения и конденсации. В случае, когда в начале процесса обратного расширения температура стенки ниже температуры влажного пара, возможен процесс конденсации, а при дальнейшем расширении влажного пара и понижении его температуры ниже температуры стенки — процесс кипения. Известно, что теплоотдача при конденсации значительно менее интенсивная, чем при кипении. Кроме того, можно предположить, что время возможного процесса конденсации существенно меньше, чем время процесса кипения [1]. Поэтому, с учётом решаемых в данной статье задач и для упрощения методики расчёта, в рамках одного типа схематизации авторы используют для расчёта теплоотдачи при конденсации и кипении одинаковые зависимости, справедливые преимущественно для процесса кипения. Поэтому в рассмотрение введены термины «пузырьковая схематизация» [1], «каплевая схематизация» и «плёночная схематизация», в нашем случае формально обобщающие процессы кипения и конденсации, но предполагающие, что при необходимости в пределах схематизации могут быть использованы различные модели описания процесса теплоотдачи. В случае «каплевой схематизации» предполагается, что фазовый переход осуществляется между каплями на поверхности теплообмена (стенки цилиндра) и сухим насыщенным паром, занимающим весь объём рабочей полости.

В статье [1] в рамках пузырьковой схематизации процесса теплообмена в рабочей камере порш-

невого тихоходного компрессора в процессе обратного расширения аммиака в области влажного пара установлено, что характер изменения текущих параметров состояния в рабочей камере, степени сухости аммиака, интегральных характеристик процесса обратного расширения существенно зависит от выбора методики расчёта величины коэффициента теплоотдачи. При этом было рассмотрено несколько альтернативных методик, применяемых в настоящее время при расчёте других технических объектов. Полученные результаты не позволяют отдать предпочтение какому-либо из них. Поскольку, с точки зрения неопределённости, в нашем случае кроме пузырьковой равнозначными являются также плёночная и каплевая модели, представляется целесообразным выполнить анализ применимости и этих вариантов методик расчёта коэффициента теплоотдачи для расчёта процесса расширения аммиака в области влажного пара, реализуемого в поршневой тихоходной ступени. Кроме этого, в данной статье будет проведена сравнительная оценка полученных результатов с результатами, представленными в [1], что позволит сформулировать рекомендации по математическому моделированию процесса обратного расширения аммиака в тихоходной поршневой компрессорной ступени. Это даст возможность проводить предварительную теоретическую оценку рабочих процессов и интегральных характеристик такой ступени, не располагая на данном этапе необходимыми данными экспериментальных исследований.

## Методика исследования

Объектом исследования является процесс обратного расширения холодильного агента (аммиака) в герметичной рабочей камере, параметры которой аналогичны параметрам рабочей камеры длинноходового тихоходного поршневого компрес-

сора с линейным приводом [2–7]. Как и в случае, рассмотренном в [1], в начале процесса обратного расширения аммиак может находиться в состоянии жидкости, влажного, перегретого или насыщенного пара (в зависимости от заданных начальных условий); при этом в процессе обратного расширения степень сухости рабочего тела может изменяться с различной интенсивностью. Для решения поставленных в статье задач применим математическую модель с сосредоточенными параметрами со следующими упрощающими допущениями: в области влажного пара насыщенная жидкость и насыщенный пар находятся в равновесии; параметры состояния рабочего тела изменяются мгновенно и одновременно по всему объему рабочей камеры; теплообмен между влажным паром и стенками рабочих полостей конвективный и может быть описан формулой Ньютона–Рихмана; в случае последовательного протекания процессов конденсации и кипения коэффициент теплоотдачи описывается одним соотношением; температура стенки постоянна и одинакова по всей поверхности рабочей камеры; внешний массообмен через клапаны и зазоры отсутствует; давление рабочего тела в начале и в конце процесса обратного расширения определяется соответствующими температурами кипения и конденсации аммиака.

Математическая модель процесса обратного расширения аммиака в области влажного пара включает в себя следующие основные уравнения: уравнение первого закона термодинамики для тела переменной массы, уравнение Клапейрона–Клаузиуса, уравнение состояния реальных газов. Более подробное описание данной модели представлено в [1].

Поскольку в данной статье рассматриваются плёночная и капельная схематизации процесса конвективной теплоотдачи, авторами был проведён анализ существующих методик расчёта коэффициента теплоотдачи для этих вариантов. Наиболее приемлемые методики расчета коэффициента теплоотдачи для плёночной модели фазовых превращений аммиака в теплообменных аппаратах и расширительных машинах представлены в [8–18]. Наиболее характерными из них являются следующие:

1) в работе [8] применяется эмпирическое соотношение:

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot K_{II}; \quad (1)$$

2) в работах [2, 13–16] рассматривается соотношение:

$$\alpha = 0,5 \cdot \left[ \frac{\lambda^3 \cdot \phi \cdot r \cdot g \cdot \rho'' (\rho' - \rho'')}{\mu \cdot S_{II} \cdot (t_{cm} - t)} \right]^{1/4}; \quad (2)$$

3) в работах [10–16] рассмотрено соотношение:

$$\alpha = 0,725 \cdot \left[ \frac{\lambda^3 \cdot \rho' \cdot g \cdot (\rho' - \rho'')}{v'' \cdot d \cdot (t_{cm} - t)} \right]^{1/4}; \quad (3)$$

4) в работах [13–17] используется зависимость:

$$\alpha = 0,62 \cdot \left[ \frac{\lambda^3 \cdot r \cdot g \cdot (\rho' - \rho'')}{v'' \cdot d \cdot (t_{cm} - t)} \right]^{1/4}; \quad (4)$$

5) в работе [18] используется зависимость:

$$Nu = 0,006 \cdot Ra^{0,5}. \quad (5)$$

Из рассмотренных авторами методик расчета коэффициента теплоотдачи для капельной модели фазовых превращений аммиака можно выделить следующие:

1) в работе [19] применяется эмпирическое соотношение:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = 6,9 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{-0,7} \cdot Pr^{0,25}; \quad (6)$$

2) в работе [20] предложено соотношение:

$$Nu = 0,21 \cdot (Ga \cdot K \cdot Pr)^{0,25} \cdot We^{-0,25}; \quad (7)$$

3) в работе [21] рассмотрено соотношение:

$$Nu = 5 \cdot 10^{-6} \cdot Re^{-1,57} \cdot Pr^{1,16} \cdot Pr^{1/3}; \quad (8)$$

4) в работе [22] используется зависимость:

$$\alpha = 2,61 \cdot 10^{-2} \cdot T_s^{4/3} \cdot \Delta T^{0,16}; \quad (9)$$

5) в работе [23] рассмотрено соотношение:

$$Nu = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{-0,84} \cdot Pr^{1,16} \cdot Pr^{1/3}. \quad (10)$$

Как и в случае пузырьковой модели, каждое из приведённых соотношений применимо для известного диапазона конструктивных и режимных параметров исследуемых объектов, при этом ни один из рассмотренных в упомянутых работах объект в полной мере не соответствует той физической модели и условиям однозначности, которые имеют место в нашем случае. В связи с этим ни одному из рассмотренных соотношений для определения числа Нуссельта на данном этапе невозможно отдать предпочтение и необходимо выполнение сравнительных расчётных исследований процесса обратного расширения при использовании разных методик.

Расчет системы дифференциальных уравнений проводился методом Рунге–Кутты 4-го порядка в пакете MathCad. При реализации математической модели рассматривались следующие условия однозначности: геометрические (изменение площади боковой поверхности зеркала цилиндра, изменение объема рабочей камеры поршневого компрессора); физические (теплофизические свойства рабочего тела (аммиак)); начальные (степень сухости, температура и давление, объем рабочей камеры); граничные (температура стенок рабочей камеры (фактор неопределенности), давление нагнетания).

### Результаты исследования

На рис. 1–4 представлены наиболее характерные результаты, отражающие влияние выбора методики расчёта коэффициента теплоотдачи (плёночная схематизация) на изменение параметров состояния расширяемого пара, его степени сухости и величины подведённой (отведённой) теплоты. В качестве исходных данных были приняты следующие параметры: температура кипения — 273 К; температура конденсации — 303 К; начальная температура влажного пара в начале процесса расширения — 303 К; рабочее тело — аммиак, средняя скорость поршня — 2 м/с; диаметр цилиндра — 0,02 м; ход поршня — 1,0 м; начальная степень сухости

P, МПа

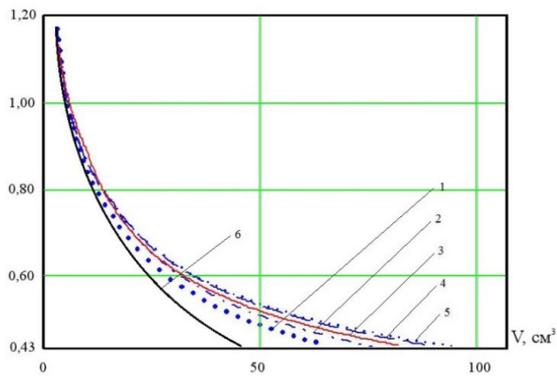


Рис. 1. Изменение давления влажного пара в процессе обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (плёночная схематизация): 1 — методика (1); 2 — методика (2); 3 — методика (3); 4 — методика (4); 5 — методика (5); 6 — внешний теплообмен отсутствует

Fig. 1. The change in pressure of wet steam in the process of reverse expansion with different options for determining the heat transfer coefficient (film schematization): 1 — methodology (1); 2 — methodology (2); 3 — methodology (3); 4 — methodology (4); 5 — methodology (5); 6 — without external heat exchange

x, кг/кг

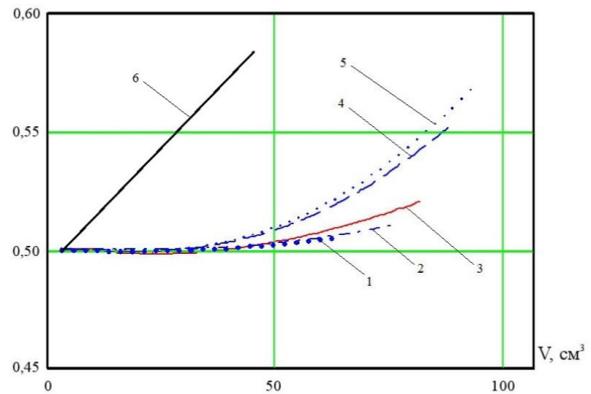


Рис. 3. Изменение степени сухости влажного пара в процессе обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (плёночная схематизация): 1 — методика (1); 2 — методика (2); 3 — методика (3); 4 — методика (4); 5 — методика (5); 6 — внешний теплообмен отсутствует

Fig. 3. Change in the degree of dryness of wet steam in the process of reverse expansion with different options for determining the heat transfer coefficient (film schematization): 1 — methodology (1); 2 — methodology (2); 3 — methodology (3); 4 — methodology (4); 5 — methodology (5); 6 — without external heat exchange

T, К

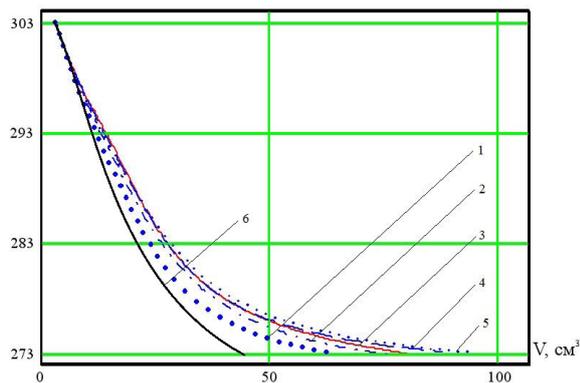


Рис. 2. Изменение температуры влажного пара в процессе обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (плёночная схематизация): 1 — методика (1); 2 — методика (2); 3 — методика (3); 4 — методика (4); 5 — методика (5); 6 — внешний теплообмен отсутствует

Fig. 2. Change in the temperature of wet steam in the process of reverse expansion with different options for determining the heat transfer coefficient (film schematization): 1 — methodology (1); 2 — methodology (2); 3 — methodology (3); 4 — methodology (4); 5 — methodology (5); 6 — without external heat exchange

Q, кДж

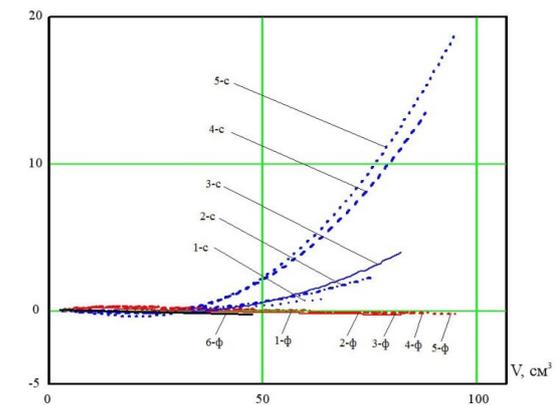


Рис. 4. Влияние выбора методики определения коэффициента теплоотдачи (плёночная схематизация) на результаты расчёта количества теплоты при конвективном теплообмене и при фазовых переходах в процессе расширения влажного пара (индекс «с» — конвективный теплообмен; индекс «ф» — фазовые переходы): 1 — методика (1); 2 — методика (2); 3 — методика (3); 4 — методика (4); 5 — методика (5); 6 — внешний теплообмен отсутствует

Fig. 4. The influence of the choice of the method for determining the heat transfer coefficient (film schematization) on the results of calculating the amount of heat during convective heat exchange and phase transitions during the expansion of wet steam (index «с» — convective heat transfer; index «ф» — phase transitions): 1 — methodology (1); 2 — methodology (2); 3 — methodology (3); 4 — methodology (4); 5 — methodology (5); 6 — without external heat exchange

— 0,5; температура внутренней поверхности стенок рабочей камеры — 288 К.

Как видно из представленных результатов, все рассмотренные методики позволяют получить приблизительно равноценные качественные результаты, обеспечивая очень схожий характер изменения величин, представленных на рис. 1–4. Однако, как и в случае, рассмотренном в [1], это ни в коей мере не относится к оценке количественных результатов как при расчёте параметров состояния (величины объёма рабочей камеры в конце процесса расширения), так и при расчёте степени сухости и тепловых потоков.

На рис. 5–8 представлены наиболее характерные результаты, отражающие влияние выбора методики расчёта коэффициента теплоотдачи при капельной схематизации на изменение параметров состояния расширяемого пара, его степени сухости и величины подведённой (отведённой) теплоты.

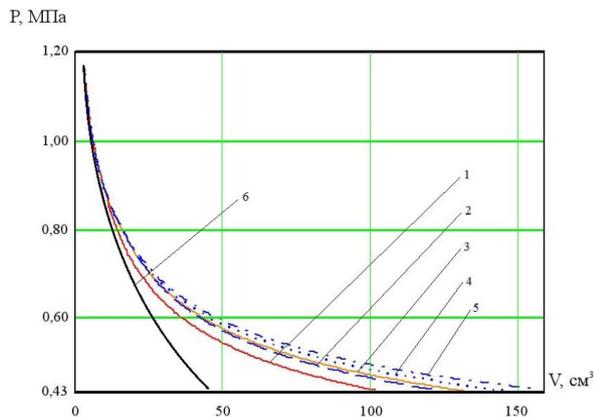


Рис. 5. Изменение давления влажного пара в процессе обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (капельная схематизация): 1 — методика (6); 2 — методика (7); 3 — методика (8); 4 — методика (9); 5 — методика (10); 6 — внешний теплообмен отсутствует

Fig. 5. Change in the pressure of wet steam in the process of reverse expansion with different options for determining the heat transfer coefficient (drip schematization): 1 — methodology (1); 2 — methodology (2); 3 — methodology (3); 4 — methodology (4); 5 — methodology (5); 6 — without external heat exchange

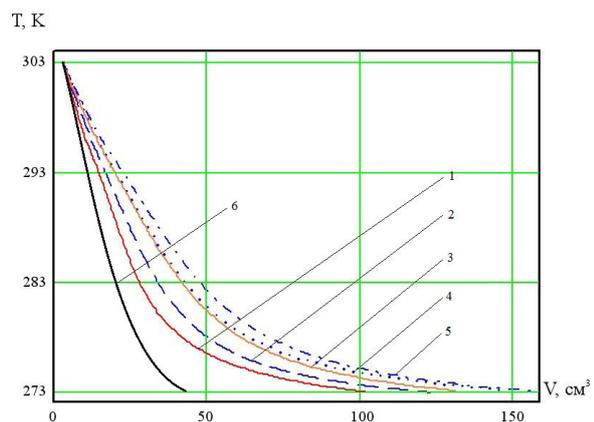


Рис. 6. Изменение температуры влажного пара в процессе обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (капельная схематизация): 1 — методика (6); 2 — методика (7); 3 — методика (8); 4 — методика (9); 5 — методика (10); 6 — внешний теплообмен отсутствует

Fig. 6. Change in the temperature of wet steam in the process of reverse expansion with different options for determining the heat transfer coefficient (drip schematization): 1 — methodology (1); 2 — methodology (2); 3 — methodology (3); 4 — methodology (4); 5 — methodology (5); 6 — without external heat exchange

Как видно из представленных результатов, все рассмотренные методики позволяют получить приблизительно равноценные качественные результаты, обеспечивая очень схожий характер изменения величин, представленных на рис. 5–6. Однако, как и в предыдущих случаях, имеет место существенное расхождение количественных результатов как при расчёте параметров состояния (величины объёма рабочей камеры в конце процесса расширения), так и при расчёте степени сухости и тепловых потоков.

На рис. 9–12 представлены совмещённые результаты для всех рассмотренных схематизаций процессов теплообмена, в том числе пузырьковой

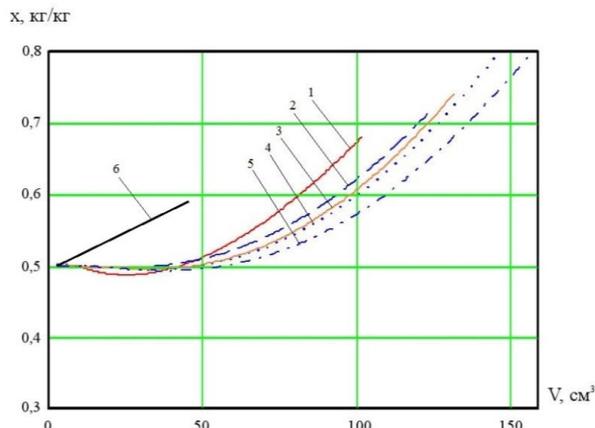


Рис. 7. Изменение степени сухости влажного пара в процессе обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (капельная схематизация):

1 — методика (6); 2 — методика (7); 3 — методика (8); 4 — методика (9); 5 — методика (10); 6 — внешний теплообмен отсутствует

Fig. 7. Change in the degree of dryness of wet steam in the process of reverse expansion with different options for determining the heat transfer coefficient (drip schematization): 1 — methodology (1); 2 — methodology (2); 3 — methodology (3); 4 — methodology (4); 5 — methodology (5); 6 — without external heat exchange

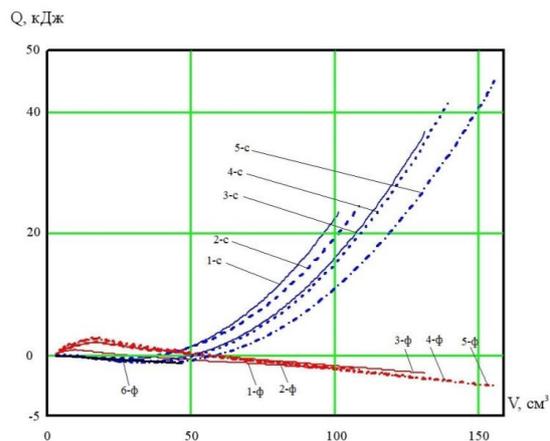


Рис. 8. Влияние выбора методики определения коэффициента теплоотдачи (капельная схематизация) на результаты расчёта количества теплоты при конвективном теплообмене и при фазовых переходах в процессе расширения влажного пара (индекс «с» — конвективный теплообмен; индекс «ф» — фазовые переходы): 1 — методика (6); 2 — методика (7); 3 — методика (8); 4 — методика (9); 5 — методика (10); 6 — внешний теплообмен отсутствует

Fig. 8. The influence of the choice of the method for determining the heat transfer coefficient (drip schematization) on the results of calculating the amount of heat during convective heat exchange and phase transitions during the expansion of wet steam (index «с» — convective heat transfer; index «ф» — phase transitions): 1 — methodology (1); 2 — methodology (2); 3 — methodology (3); 4 — methodology (4); 5 — methodology (5); 6 — without external heat exchange

[1]. Здесь индексы «пуз», «пл» и «к» обозначают соответственно пузырьковую, плёночную и капельную модели расчёта коэффициентов теплоотдачи при конвективном теплообмене. Для пузырьковой схематизации обозначения кривых с 1-й по 4-ю соответствуют методикам, описанным формулами с (9) по (12) в работе [1]; для плёночной схематизации обозначения кривых с 1-й по 5-ю соответствуют

P, МПа

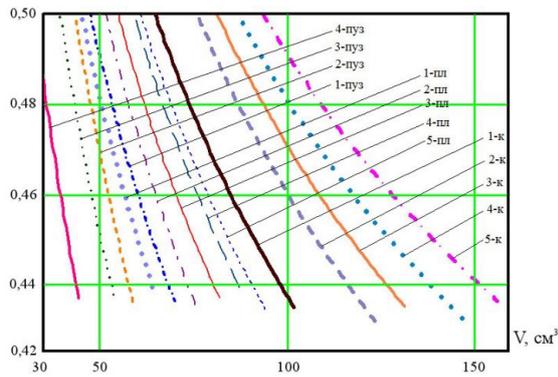


Рис. 9. Изменение давления влажного пара в конечной стадии процесса обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (обобщённые результаты)

Fig. 9. Change in the pressure of wet steam in the final stage of the reverse expansion process with different options for determining the heat transfer coefficient (generalized results)

T, K

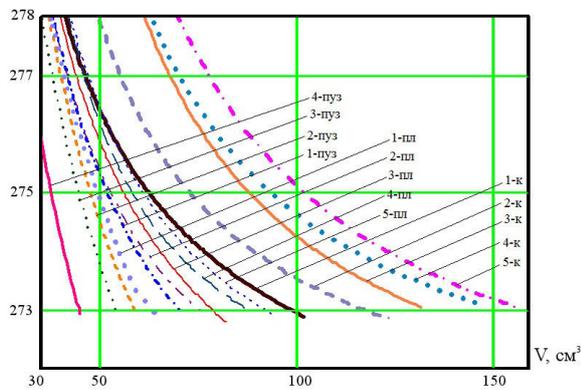


Рис. 10. Изменение температуры влажного пара в конечной стадии процесса обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (обобщённые результаты)

Fig. 10. Change in the temperature of wet steam in the final stage of the reverse expansion process with different options for determining the heat transfer coefficient (generalized results)

методикам, представленным в настоящей статье формулами с (1) по (5); для капельной схематизации обозначения кривых с 1-й по 5-ю соответствуют формулам с (6) по (10).

С точки зрения влияния на такие интегральные характеристики рабочего процесса рассматриваемого компрессора, как возвращаемая в процессе обратного расширения индикаторная мощность и потери производительности, наибольший интерес представляют результаты, представленные на рис. 9. Как видим, для одного и того же режима работы и неизменных конструктивных параметров компрессорной ступени диапазон величины объёма рабочей камеры, при котором завершается процесс обратного расширения, может составлять от 40 см<sup>3</sup> до 160 см<sup>3</sup> в зависимости от применяемой методики расчёта коэффициента теплоотдачи. Такой существенный разброс расчётных результатов подтверждает значимость проблемы выбора этой методики. По-видимому, данная ситуация может предполагать различные варианты создания обоб-

x, кг/кг

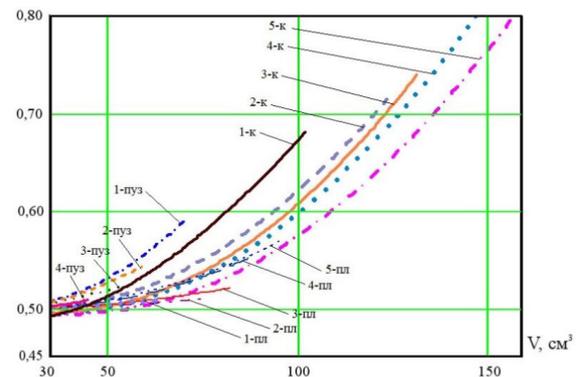


Рис. 11. Изменение степени сухости влажного пара в конечной стадии процесса обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (обобщённые результаты)

Fig. 11. Change in the degree of dryness of wet steam in the final stage of the reverse expansion process with different options for determining the heat transfer coefficient (generalized results)

x, кг/кг

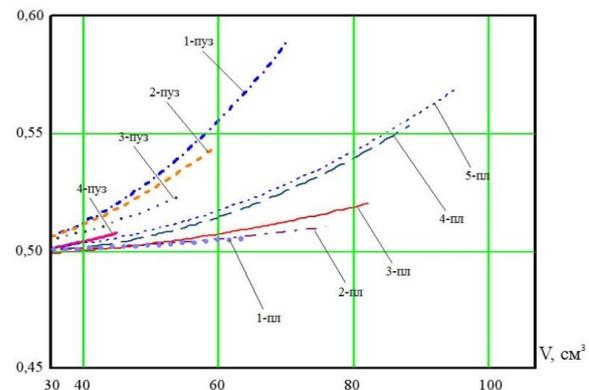


Рис. 12. Изменение степени сухости влажного пара в конечной стадии процесса обратного расширения при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи (пузырьковое и плёночное кипение)

Fig. 12. Change in the degree of dryness of wet steam in the final stage of the reverse expansion process with different options for determining the heat transfer coefficient (bubble and film boiling)

щённой методики расчёта рабочих процессов тихоходной компрессорной ступени с учётом сжатия аммиака в области влажного пара. Пока же ограничимся предварительным анализом полученных результатов. Наиболее очевидным из них является то, что выбор схематизированной модели является наиболее значимым фактором. На рис. 9 хорошо видно, что все результаты группируются на три части: для пузырьковой схематизации конечная величина объёма рабочей камеры в конце процесса обратного расширения лежит в диапазоне от 40 см<sup>3</sup> до 70 см<sup>3</sup>; для плёночной схематизации — в диапазоне от 60 см<sup>3</sup> до 100 см<sup>3</sup>; для капельной схематизации — в диапазоне от 115 см<sup>3</sup> до 155 см<sup>3</sup>. То есть в пределах одной схематизации разброс этих величин относительно средней величины составляет 30...40 см<sup>3</sup> (30...60 %), тогда как результаты графиков «4-пуз» и «5-к» отличаются в несколько раз. Полезно отметить, что плёночная схематизация обеспечивает расчётные результаты, близкие к некоторому осреднённому значению. Аналогичные выводы сле-

Таблица 1. Условные обозначения и индексы для формул (1)...(10)

Table 1. Symbols and indexes

Обозначение	Наименование	Единица измерения
$r$	Удельная теплота парообразования	кДж/кг
$\lambda$	Коэффициент теплопроводности насыщенного пара	Вт/м·К
$\mu$	Коэффициент динамической вязкости насыщенного пара	Па·с
$\nu''$	Коэффициент кинематической вязкости насыщенного пара	м <sup>2</sup> /с
$t_{cm}$	Температура стенки	°С
$t$	Температура насыщенного пара	°С
$\varphi$	Эмпирический коэффициент	—
$\rho', \rho''$	Плотность насыщенной жидкости и насыщенного пара	кг/м <sup>3</sup>
$d$	Внутренний диаметр цилиндра	м
$S_p$	Ход поршня	м
$Gr$	Число Грасгофа [8–16]	—
$We$	Число Вебера [8–16]	—
$Pr$	Число Прандтля [8–16]	—
$Ra$	Число Релея [8–16, 18]	—
$Re$	Число Рейнольдса [8–16]	—
$K_{\tau}$	Комплексная переменная, характеризующая отношение теплоты испарения к теплоте перегрева жидкости [8–16, 20]	—
$K$	Величина, обратная числу Якоба, представляющая собой произведение числа Кутателадзе и числа отношения плотностей насыщенного пара и жидкости [8]	—
$P$	Расклинивающее давление [8–16, 19, 21]	—
$T_s$	Температура насыщения	—
$\Delta T$	Температурный напор между стенкой и влажным паром	—

дуют и из анализа результатов температуры расширяемого аммиака (рис. 10).

Из анализа результатов расчётов величины степени сухости аммиака в конце процесса обратного расширения (рис. 11, 12) видно, что для большинства методик, применяемых при пузырьковой и плёночной схематизации расхождение результатов составляет не более 10 % (12...18 % только для методик «1-пуз» и «5-пл»). При капельной схематизации процессы массообмена протекают существенно интенсивнее, и в результате расхождение расчётов с плёночной схематизацией может составлять около 60 % (по отношению к последним); при этом расхождение результатов расчётов по различным методикам «внутри» капельной схематизации составляет 10...15 % (рис. 11).

### Заключение

Полученные результаты расчетных исследований выявили принципиально важное значение выбора типа схематизации и реализующей её методики расчёта процесса теплообмена при расширении

аммиака в области влажного пара применительно к поршневой тихоходной длинноходовой компрессорной ступени. Даже без учёта влияния различия между методиками описания теплообмена при конденсации и кипении в достаточно узком диапазоне конструктивных и режимных параметров исследуемого объекта, выявлены существенные различия в результатах. Например, величины расчёта объёма рабочей камеры, при котором завершается процесс обратного расширения, могут отличаться в несколько раз в зависимости от применяемой методики расчёта процесса теплообмена; а в пределах одного типа схематизации это отличие может составлять 30...60 %.

В связи с этим при разработке обобщённой методики расчёта рабочего процесса аммиачной поршневой тихоходной длинноходовой компрессорной ступени первоочередной задачей является более тщательный анализ и обоснование применимости рассмотренных типов схематизации и реализующих их методик расчёта процесса теплообмена. Кроме того, выявленная существенная методологическая неопределённость диктует необходимость проведения экспериментальных исследований, результаты которых обеспечили бы верификацию расчётной методики.

### Список источников

1. Юша В. Л., Чернов Г. И., Садвакасов Д. Х. Анализ влияния факторов неопределённости на математическое моделирование процесса обратного расширения аммиака в тихоходной поршневой компрессорной ступени. Часть 1 // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 1. С. 44–54. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-44-54.
2. Yusha V. L., Karagusov V. I., Busarov S. S. Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors // Chemical and petroleum engineering. 2015. Vol. 51, Issue 3-4. P. 177–182. DOI: 10.1007/s10556-015-0020-5.
3. Yusha V. L., Den'gin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Gromov A. Yu. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 264–269. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.333.
4. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Titov D. S. Analysis of the efficiency of external cooling of slow-speed long-stroke oil-free reciprocating compressor stages with asymmetric design scheme // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007 (1). 030055. DOI: 10.1063/1.5051916.
5. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V. Analysis of the Operating cycle Efficiency of the Long-Stroke Slow Stage under the Changing Ratio of the Piston Forward and Backward Stroke Time // Oil and Gas Engineering (OGE-2018): AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007 (1). 030058. DOI: 10.1063/1.5051919.
6. Yusha V. L., Chernov G. I., Sadvakasov D. H. The Efficiency Theoretical Analysis of the Ammonia Refrigeration Cycle Based on the Compression in the Wet Vapor Region // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2285. 030078. DOI: 10.1063/5.0029565.
7. Садвакасов Д. Х., Чернов Г. И., Юша В. Л. Анализ влияния факторов неопределённости на математическое моделирование процесса сжатия аммиака в области влажного пара // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 30–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-30-38.
8. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е, перераб. и доп. Москва: Атомиздат, 1979. 416 с.
9. Теоретические основы хладотехники. Часть II. Теплообмен / Под ред. С. Н. Богданова, Н. А. Бучко, Э. И. Гуйго [и др.]. Москва: КолосС, 1994. 367 с.

10. Данилова Г. Н., Богданов С. Н., Иванов О. П. [и др.]. Теплообменные аппараты холодильных установок. 2-е изд. перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. 303 с.

11. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Москва: Энергия, 1977. 344 с.

12. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. Москва: Энергия, 1967. 412 с.

13. Аметистов Е. В., Григорьев В. А., Емцев Б. Т. [и др.]. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 512 с.

14. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен. Москва: Изд-во МЭИ, 2011. 558 с.

15. Брюханов О. Н., Шевченко С. Н. Тепломассообмен. Москва: ИНФРА-М, 2014. 463 с.

16. Кудин А. А. Тепломассообмен. Москва: ИНФРА-М, 2012. 374 с.

17. Войнов Н. А., Жукова О. П., Николаев А. Н. Теплоотдача при конденсации и кипении в пленочном трубчатом испарителе // Теоретические основы химической технологии. 2012. Т. 46, № 4. С. 432–440.

18. Агульник А. Б., Динь Т. З. Расчетное исследование параметров ГТУ малой мощности на основе авиационных двигателей при «влажном» сжатии // Научно-технологический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 36–39.

19. Васильев П. С., Рева Л. С., Рева С. Л. [и др.]. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении капли жидкости на поверхности нагрева // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 22. С. 28–33.

20. Панюлайтис А. С., Барабанов В. Г., Васильев П. С. Разработка автоматизированной системы испарительного охлаждения методических печей с использованием гидравлических форсунок и капельного кипения жидкости // Известия ВолГТУ. 2021. № 8 (255). С. 79–80. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-8-255-78-80.

21. Васильев П. С., Рева Л. С., Голованчиков А. Б. Температура максимальной эффективности протекания процесса капельного кипения жидкости в реальных условиях // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование. Москва: Изд-во РГУ им. А. Н. Косыгина, 2019. Т. 2. 260 с. ISBN 978-5-87055-815-8.

22. Birdi K. S., Vu D. T., Winter A. A study of the evaporation rates of small water drops placed on a solid surface // The

Journal of Physical Chemistry. 1989. Vol. 93 (9). DOI: 10.1021/J100346A065.

23. Chen R.-H., Phuoc T. X., Martello D. Surface tension of evaporating nanosized droplets // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 54 (11). P. 2459–2466.

**САДВАКАСОВ Даурен Хайринович**, ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5444-8510

AuthorID (РИНЦ): 1013658

AuthorID (SCOPUS): 57191039081

Адрес для переписки: dkhsadvakasov@omgtu.ru

**ЧЕРНОВ Герман Игоревич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2144-5462

AuthorID (РИНЦ): 176943

AuthorID (SCOPUS): 56503369900

Адрес для переписки: gj\_chernov2002@mail.ru

**ЮША Владимир Леонидович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Холодильная и компрессорная техника и технология», ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Адрес для переписки: yusha@omgtu.ru

#### Для цитирования

Садвакасов Д. Х., Чернов Г. И., Юша В. Л. Анализ влияния факторов неопределенности на математическое моделирование процесса обратного расширения аммиака в тихоходной поршневой компрессорной ступени. Часть 2 // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 2. С. 50–58. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-50-58.

Статья поступила в редакцию 01.04.2022 г.

© Д. Х. Садвакасов, Г. И. Чернов, В. Л. Юша

# THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF UNCERTAINTY FACTORS ON MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF REVERSE EXPANSION OF AMMONIA IN LOW-SPEED RECIPROCATING COMPRESSOR STAGE. PART 2

D. Kh. Sadvakasov, G. I. Chernov, V. L. Yusha

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The paper presents the analysis of influence of the method of calculating the heat transfer coefficient on mathematical modeling of the process of reverse expansion of ammonia in the working chamber of the reciprocating compressor stage (in the area of wet steam). Alternative variants of film and drip schematization of the heat exchange process are considered. The mathematical model is based on the equations of the first law of thermodynamics for a body of variable mass, the equation of state of a real gas, the Clapeyron–Clausius and Newton–Richman equations. Based on the results of the computational and parametric analysis, the applicability of known methods for calculating the heat transfer coefficient to the object under consideration is evaluated.

**Keywords:** ammonia, wet steam, superheated steam, reverse expansion process, mathematical model, heat transfer coefficient, film schematization, drip schematization.

## References

1. Sadvakasov D. Kh., Chernov G. I., Yusha V. L. Analiz vliyaniya faktorov neopredelennosti na matematicheskoye modelirovaniye protsessa obratnogo rasshireniya ammiaka v tikhokhodnoy porshnevoy kompressornoy stupeni. Chast' 1 [The analysis of influence of uncertainty factors on mathematical modeling of process of reverse expansion of ammonia in low-speed reciprocating compressor stage. Part 1] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 1. P. 44–54. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-44-54. (In Russ.).
2. Yusha V. L., Karagusov V. I., Busarov S. S. Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors // Chemical and petroleum engineering. 2015. Vol. 51, Issue 3-4. P. 177–182. DOI: 10.1007/s10556-015-0020-5. (In Engl.).
3. Yusha V. L., Den'gin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Gromov A. Yu. The estimation of thermal conditions of highly-cooled long-stroke stages in reciprocating compressors // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 264–269. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.333. (In Engl.).
4. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Titov D. S. Analysis of the efficiency of external cooling of slow-speed long-stroke oil-free reciprocating compressor stages with asymmetric design scheme // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007 (1). 030055. DOI: 10.1063/1.5051916. (In Engl.).
5. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V. Analysis of the Operating cycle Efficiency of the Long-Stroke Slow Stage under the Changing Ratio of the Piston Forward and Backward Stroke Time // Oil and Gas Engineering (OGE-2018): AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007 (1). 030058. DOI: 10.1063/1.5051919. (In Engl.).
6. Yusha V. L., Chernov G. I., Sadvakasov D. H. The Efficiency Theoretical Analysis of the Ammonia Refrigeration Cycle Based on the Compression in the Wet Vapor Region // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2285. 030078. DOI: 10.1063/5.0029565. (In Engl.).
7. Sadvakasov D. Kh., Chernov G. I., Yusha V. L. Analiz vliyaniya faktorov neopredelennosti na matematicheskoye modelirovaniye protsessa szhatiya ammiaka v oblasti vlazhnogo para [The analysis of uncertainty factors influence on mathematical modeling of ammonia compression in wet vapor area] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 30–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-30-38. (In Russ.).
8. Kutateladze S. S. Osnovy teorii teploobmena [Basics of the theory of heat transfer]. 5th ed. Moscow, 1979. 416 p. (In Russ.).
9. Teoreticheskiye osnovy khladotekhniki. Chast' II. Teplomassoobmen [Theoretical foundations of refrigeration engineering. Part II. Heat and mass transfer] / Eds.: S. N. Bogdanov, N. A. Buchko, E. I. Guygo [et al.]. Moscow, 1994. 367 p. (In Russ.).
10. Danilova G. N., Bogdanov S. N., Ivanov O. P. [et al.]. Teploobmennyye apparaty kholodil'nykh ustanovok [Heat exchangers for refrigeration units]. 2nd ed. Leningrad, 1986. 303 p. (In Russ.).
11. Mikheyev M. A., Mikheyeva I. M. Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]. Moscow, 1977. 344 p. (In Russ.).
12. Petukhov B. S. Teploobmen i soprotivleniye pri laminarnom techenii zhidkosti v trubakh [Heat transfer and resistance in laminar fluid flow in pipes]. Moscow, 1967. 412 p. (In Russ.).
13. Ametistov E. V., Grigoryev V. A., Emtsev B. T. [et al.]. Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskiy eksperiment. Spravochnik [Heat and mass transfer. Handbook]. Moscow, 1982. 512 p. (In Russ.).
14. Tsvetkov F. F., Grigor'yev B. A. Teplomassoobmen [Heat and mass transfer] Moscow, 2011. 558 p. (In Russ.).
15. Bryukhanov O. N., Shevchenko S. N. Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. Moscow, 2014. 463 p. (In Russ.).
16. Kudinov A. A. Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. Moscow, 2012. 374 p. (In Russ.).
17. Voynov N. A., Zhukova O. P., Nikolayev A. N. Teplootdacha pri kondensatsii i kipenii v plenochnom trubchatom isparitele [Heat transfer in condensation and boiling in a tubular film evaporator] // Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2012. Vol. 46, no. 4. P. 432–440. (In Russ.).

18. Agulnik A. B., Din T. Z. Raschetnoye issledovaniye parametrov GTU maloy moshchnosti na osnove aviatsionnykh dvigateley pri «vlazhnom» szhatii [Calculated research of parameters of low power gas turbine, based on aircraft engine during «wet» compression] // Nauchno-tekhnologicheskii vestnik Povolozh'ya. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2013. No. 4. P. 36–39. (In Russ.).

19. Vasilyev P. S., Reva L. S., Reva S. L. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye teplootdachi pri kipenii kapli zhidkosti na poverkhnosti nagreva [Experimental study of heat transfer during boiling of a liquid drop on the heating surface] // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. *Bulletin of the Technological University*. 2017. Vol. 20, no. 22. P. 28–33. (In Russ.).

20. Panyulaytis A. S., Barabanov V. G., Vasilyev P. S. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy isparitel'nogo okhlazhdeniya metodicheskikh pechey s ispol'zovaniyem gidravlicheskikh forsunok i kapel'nogo kipeniya zhidkosti [Development of an automated system for evaporative cooling of methodical furnaces using hydraulic nozzles and droplet boiling of liquid] // Izvestiya VolGTU. *Izvestia VSTU*. 2021. No. 8 (255). P. 79–80. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-8-255-78-80. (In Russ.).

21. Vasil'yev P. S., Reva L. S., Golovanchikov A. B. Temperatura maksimal'noy effektivnosti protekaniya protsessa kapel'nogo kipeniya zhidkosti v real'nykh usloviyakh [The temperature of the maximum efficiency of the liquid drip boiling process in real conditions] // Energoresursoeffektivnyye ekologicheski bezopasnyye tekhnologii i oborudovaniye. *Energoresursoeffektivnyye Ekologicheski Bezopasnyye Tekhnologii i Oborudovaniye*. Moscow, 2019. Vol. 2. 260 p. ISBN 978-5-87055-815-8. (In Russ.).

22. Birdi K. S., Vu D. T., Winter A. A study of the evaporation rates of small water drops placed on a solid surface // The Journal of Physical Chemistry. 1989. Vol. 93 (9). DOI: 10.1021/J100346A065. (In Engl.)

23. Chen R.-H., Phuoc T. X., Martello D. Surface tension of evaporating nanoid droplets // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 54 (11). P. 2459–2466. (In Engl.)

**SADVAKASOV Dauren Khayrinovich**, Assistant of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 5444-8510

AuthorID (RSCI): 1013658

AuthorID (SCOPUS): 57191039081

Correspondence address: dkhsadvakasov@omgtu.ru

**CHERNOV German Igorevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2144-5462

AuthorID (RSCI): 176943

AuthorID (SCOPUS): 56503369900

Correspondence address: gi\_chernov2002@mail.ru

**YUSHA Vladimir Leonidovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1503-9666

ORCID: 0000-0001-9858-7687

AuthorID (SCOPUS): 6505861937

ResearcherID: J-8079-2013

Correspondence address: yusha@omgtu.ru

#### For citations

Sadvakasov D. Kh., Chernov G. I., Yusha V. L. The analysis of influence of uncertainty factors on mathematical modeling of the process of reverse expansion of ammonia in low-speed reciprocating compressor stage. Part 2 // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 50–58. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-50-58.

Received April 01, 2022.

© D. Kh. Sadvakasov, G. I. Chernov, V. L. Yusha