

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ БЫСТРОХОДНОСТИ АММИАЧНОЙ ТИХОХОДНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ НА ПРОЦЕССЫ ОБРАТНОГО РАСШИРЕНИЯ И ВСАСЫВАНИЯ В ОБЛАСТИ ВЛАЖНОГО ПАРА

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

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

В работе представлена математическая модель совмещенных процессов обратного расширения и всасывания в области влажного пара, реализуемых в аммиачной тихоходной длинноходовой поршневой компрессорной ступени. Основу математической модели составляют уравнения первого закона термодинамики для тела переменной массы, уравнение состояния реального газа, уравнения Клапейрона–Клаузиуса и Ньютона–Рихмана; рассмотрены также различные варианты реализации методики расчета процесса теплообмена в рабочей камере ступени. Выполнен расчетно-параметрический анализ влияния скорости поршня на потери производительности компрессорной ступени и на величину степени сухости аммиака в конце процесса всасывания, учитывающий существующие факторы неопределенности как в части выбора методики расчета процессов теплообмена, так и в части выбора граничных и начальных условий.

**Ключевые слова:** поршневая компрессорная ступень, аммиак, влажный пар, процесс обратного расширения, процесс всасывания, математическая модель, коэффициент теплоотдачи.

## Введение

Парокомпрессионные холодильные циклы термодинамически могут быть реализованы при сжатии рабочего тела в области влажного пара [1–2]. В быстроходных холодильных компрессорах процессы сжатия хладагента в области влажного пара рассматриваются преимущественно с точки зрения снижения теплонапряженности компрессорной ступени, что достигается путем испарения жидкой фракции в процессе сжатия [3–6]. Особенности реализации рабочего цикла в тихоходной длинноходовой поршневой компрессорной ступени показывают, что уникальное соотношение режимных и конструктивных факторов такой ступени позволяет обеспечить так называемое «квазиизотермическое сжатие» при «сухом» сжатии, то есть без дополнительной подачи капельной охлаждающей жидкости в рабочую камеру; при этом даже значительное повышение давления сжимаемого рабочего тела в ступени компрессора происходит при сравнительно незначительном увеличении его температуры [7–10]. Это позволяет сделать теоретическое предположение о том, что в такой компрессорной ступени можно реализовать совмещенные процессы сжатия и конденсации хладагента [11]. Рассмотренные ранее особенности процесса обратного расширения в тихоходной длинноходовой компрессорной ступени предполагают его определяющее влияние как на процесс всасывания в целом, так и на производительность ступени и величину степени сухости в конце процесса всасывания (в начале процесса сжатия) [12–13]. Результаты этих исследований показали, что при наличии достаточно значимых факторов неопределенности, влияющих на процесс обратного расширения, время протекания этого процесса является также достаточно значимым фактором, но при этом однозначно опреде-

ленным. В связи с этим предметом исследования данной статьи стало исследование влияния величины времени протекания, то есть скорости поршня, на процессы обратного расширения и всасывания аммиачной тихоходной компрессорной ступени, реализуемые в области влажного пара. Исследование совместных последовательно протекающих процессов обратного расширения позволит провести анализ как параметров состояния аммиака, так и интегральных характеристик, определяющих производительность компрессора и величину индикаторной работы расширения.

## Методика исследования

Предметом исследования являются последовательно протекающие процессы обратного расширения и всасывания холодильного агента (аммиака) в рабочей камере, параметры которой аналогичны параметрам рабочей камеры длинноходового тихоходного поршневого компрессора с линейным приводом [11, 13–18]. Как и в случае, рассмотренном в [11], для расчета процессов обратного расширения и всасывания аммиака, целесообразно применить математическую модель с сосредоточенными параметрами при следующих упрощающих допущениях: в области влажного пара насыщенный пар 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; температура стенки постоянна и одинакова по всей поверхности рабочей камеры; внешний массообмен через зазоры отсутствует; параметры состояния аммиака в камере всасывания постоянны в течение всего расчетного интервала времени и определя-

ются его температурой кипения; давление рабочего тела в начале процесса обратного расширения определяется температурой конденсации аммиака.

Математическая модель процесса сжатия аммиака в области влажного пара включает в себя следующие основные уравнения.

Уравнение первого закона термодинамики для тела переменной массы:

$$dU = \delta Q - dL + h'' \cdot dm + h_{bc} \cdot dm_{bc},$$

где  $dU$  — изменение внутренней энергии пара;  $\delta L$  — работа расширения, учитывающая как изменение объема рабочей полости, как и изменения объема сжимаемого пара за счет его конденсации;  $h'' \cdot dm$  — изменение внутренней энергии, обусловленное массопереносом внутри контрольного объема (фазовые переходы во влажном паре);  $dm$  — изменение массы насыщенного пара, обусловленное фазовыми переходами;  $h_{bc} \cdot dm_{bc}$  — изменение внутренней энергии, обусловленное внешним массообменом через клапан всасывания;  $dm_{bc}$  — изменение массы насыщенного пара, обусловленное внешним массообменом через клапан всасывания;  $\delta Q$  — суммарное количество теплоты, учитывающее фазовый и конвективный тепловые потоки.

Суммарное количество теплоты можно представить в виде:

$$\delta Q = \delta Q_{\phi} + \delta Q_{к}.$$

Фазовый теплообмен, учитывающий процесс фазового перехода между насыщенным паром и насыщенной жидкостью:

$$\delta Q_{\phi} = r dm,$$

где  $dm$  — изменение массы насыщенного пара.

Конвективный теплообмен, который осуществляется между внутренней стенкой и рабочим телом, описывается уравнением Ньютона — Рихмана:

$$\delta Q_{к} = \alpha \cdot (T_{p.m.} - T_{cm}) \cdot dF \cdot dt,$$

где  $dF$  — изменение площади боковой поверхности;  $dt$  — элементарное время протекания процесса.

Уравнение Клапейрона — Клаузиуса определяет соотношение между температурой и давлением в области влажного пара:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{r}{T \cdot (v'' - v')}.$$

Изменение массы рабочего тела в контрольном объеме за счет внешнего массообмена через клапан всасывания рассчитывается по известным зависимостям [19–20]. Уравнение состояния реальных газов позволяет определить взаимосвязь между параметрами состояния насыщенного пара:

$$P \cdot V = z \cdot m \cdot R \cdot T,$$

где  $m$  — масса сжимаемого пара (сухого или насыщенного);  $z$  — коэффициент сжимаемости [21].

Как было показано ранее [12–13], в представленной модели существенно неопределенным является расчет конвективной теплоотдачи. Поскольку при исследовании последовательно протекающих процессов обратного расширения и всасывания не избежать рассмотрения нескольких вариантов

различных методик расчета коэффициента теплоотдачи, целесообразно ограничиться обоснованным перечнем этих методик. Для этого прежде всего обоснуем выбор схематизации процессов конвективного теплообмена при расчете обратного расширения и всасывания аммиака в области влажного пара. Так, как при степени сухости влажного пара, близкой к 1 ( $x \geq 0,9$ ), объем жидкой фазы пренебрежимо мал, допустимо рассчитывать коэффициент теплоотдачи по известным зависимостям для однофазного рабочего тела [22–27]. В рамках рассматриваемых пленочной, пузырьковой и капельной схематизаций процесса конвективной теплоотдачи на данном этапе целесообразно применить для расчетов те методики, которые дают «средний» результат с известной погрешностью относительно аналогичных методик для данной схематизации [13]. Такими методиками являются следующие:

1) для пленочной схематизации в соответствии с [22–28, 30] будет использоваться следующее эмпирическое соотношение:

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

2) для капельной схематизации [28] рассматривается соотношение:

$$Nu = 0,21 \cdot (Ga \cdot K \cdot Pr)^{0,25} \cdot We^{-0,25}; \quad (2)$$

3) для пузырьковой схематизации целесообразно рассматривать эмпирическое соотношение, представленное в [29–31]:

$$Nu = 0,5 Ra^{1/4}. \quad (3)$$

Расчет системы дифференциальных уравнений производился с использованием метода Рунге — Кутты 4-го порядка в пакете MathCad. При реализации математической модели рассматривались следующие условия однозначности: геометрические (диаметр цилиндра и ход поршня, изменение площади боковой поверхности зеркала цилиндра, изменение объема рабочей камеры поршневого компрессора; эквивалентная площадь клапана всасывания); физические (теплофизические свойства рабочего тела (аммиак)); начальные (степень сухости, температура и давление, объем рабочей камеры); граничные (температура стенок рабочей камеры (фактор неопределенности), давление нагнетания, параметры состояния аммиака в камере всасывания, скорость поршня).

## Результаты исследования

На рис. 1–3 представлены наиболее характерные результаты, отражающие влияние выбора схематизации процесса теплоотдачи в рабочей камере компрессора (с использованием приведенных выше методик расчета коэффициента теплоотдачи) на изменение параметров состояния расширяемого пара и его степени сухости. В качестве исходных данных были приняты следующие параметры: температура кипения — 273К; температура конденсации — 303К; начальная температура влажного пара в начале процесса расширения — 303К; рабочее тело — аммиак, диаметр цилиндра — 0,02 м; ход поршня — 1,0 м; начальная степень сухости — 0,5; температура внутренней поверхности стенок рабочей камеры —

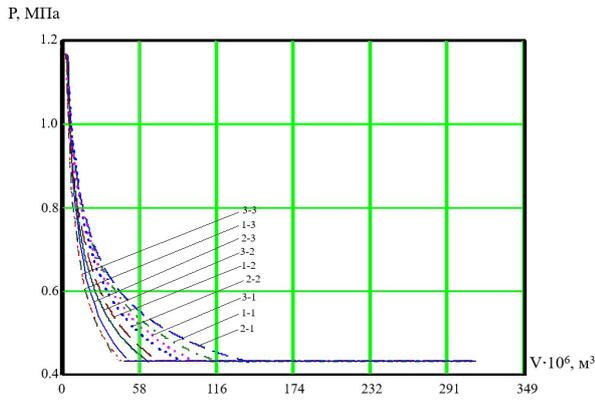


Рис. 1. Изменение давления влажного пара в процессах обратного расширения и всасывания при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи и времени протекания этих процессов

Fig. 1. Change in the pressure of wet steam in the processes of reverse expansion and suction with different options for determining the heat transfer coefficient and the time of these processes

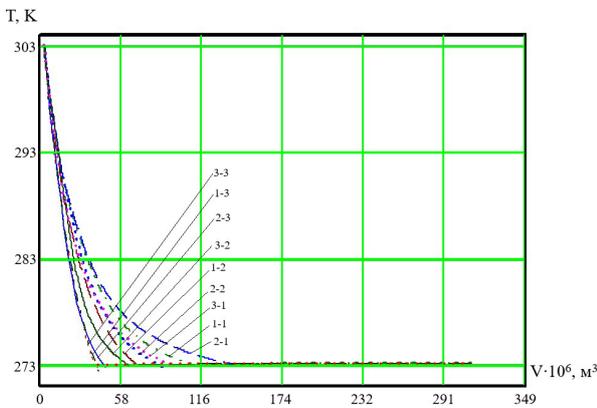


Рис. 2. Изменение температуры влажного пара в процессах обратного расширения и всасывания при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи и времени протекания этих процессов

Fig. 2. Change in the temperature of wet steam in the processes of reverse expansion and suction with different options for determining the heat transfer coefficient and the time of these processes

288 К. На представленных диаграммах и графиках приняты следующие обозначения: 1-1 пузырьковая схематизация, время процесса 1,0 с; 1-2 пузырьковая схематизация, время процесса 0,5 с; 1-3 пузырьковая схематизация, время процесса 0,05 с; 2-1 плёночная схематизация, время процесса 1,0 с; 2-2 плёночная схематизация, время процесса 0,5 с; 2-3 плёночная схематизация, время процесса 0,05 с; 3-1 капельная схематизация, время процесса 1,0 с; 3-2 капельная схематизация, время процесса 0,5 с; 3-3 капельная схематизация, время процесса 0,05 с.

Из представленных результатов видно, что изменение параметров состояния насыщенного пара в процессе обратного расширения существенно зависит от скорости протекания этого процесса, а количественные результаты — от выбора расчётной схематизации процесса теплообмена (рис. 1, 2). Это соответствует результатам, представленным в [13]. А изменения параметров состояния в процессе всасывания практически не происходит вне зависимости от скорости протекания процесса

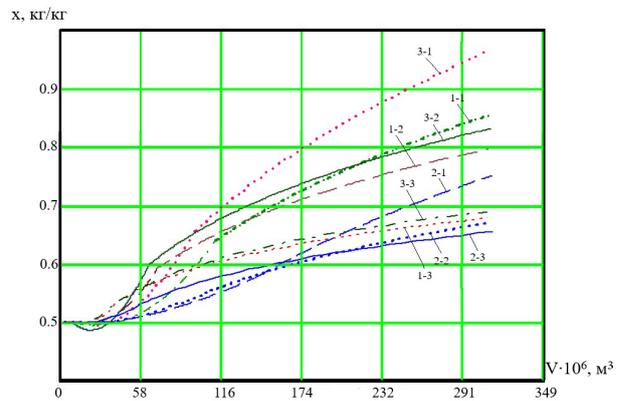


Рис. 3. Изменение степени сухости влажного пара в процессах обратного расширения и всасывания при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи и времени протекания этих процессов

Fig. 3. Change in the degree of dryness of wet steam in the processes of reverse expansion and suction with different options for determining the heat transfer coefficient and the time of these processes

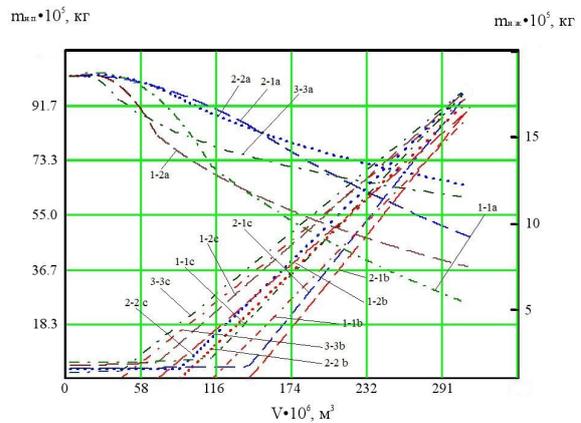


Рис. 4. Изменение массы насыщенного пара и жидкости в процессах обратного расширения и всасывания при разных вариантах определения коэффициента теплоотдачи и разным времени протекания этих процессов

Fig. 4. Change in the mass of saturated vapor and liquid in the processes of reverse expansion and suction with different options for determining the heat transfer coefficient and different times for these processes

и выбора расчетной схематизации процесса теплообмена. При этом степень сухости влажного пара в процессе всасывания изменяется значительно; в ряде случаев это изменение соизмеримо или даже превосходит величину изменения степени сухости в процессе обратного расширения (рис. 3). Это легко объясняется тем, что в процессе всасывания происходит не только испарение жидкой фазы аммиака, но и поступает дополнительная масса сухого насыщенного пара из камеры всасывания.

На рис. 4–7 представлены закономерности изменения массы компонентов рабочего тела в рассматриваемых процессах. В данном случае на диаграммах и графиках цифровое обозначение кривых соответствует обозначениям, принятым на рисунках 1–3; помимо этого, введены дополнительные буквенные обозначения: а — масса насыщенной жидкости; b — масса сухого насыщенного пара, поступающего из камеры всасывания; с — суммарная масса насыщенного пара в процессах обратного расширения и всасывания.

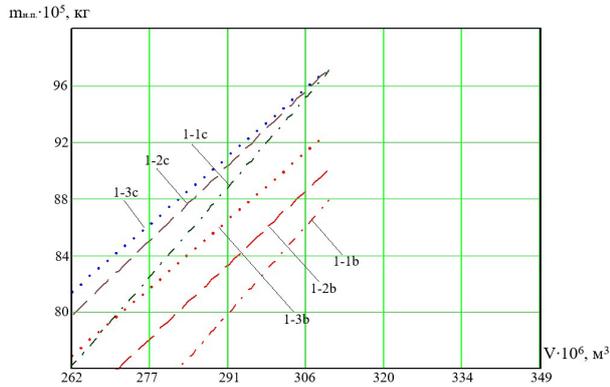


Рис. 5. Изменение массы насыщенного пара в конце процесса всасывания при разном времени протекания (пузырьковая схематизация)

Fig. 5. Change in the mass of saturated steam at the end of the suction process at different flow times (bubble schematization)

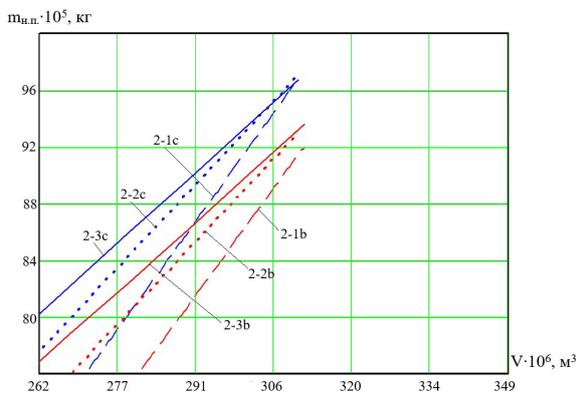


Рис. 6. Изменение массы насыщенного пара в конце процесса всасывания при разном времени протекания (плёночная схематизация)

Fig. 6. Change in the mass of saturated steam at the end of the suction process at different flow times (film schematization)

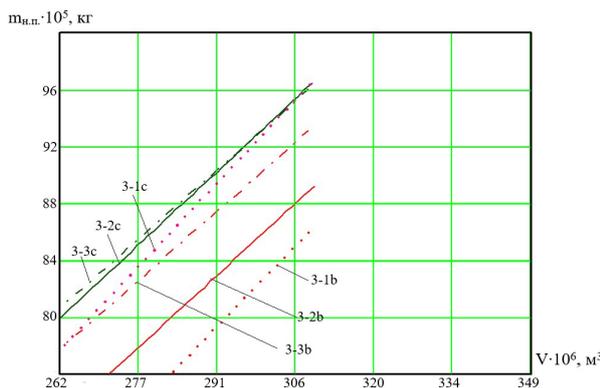


Рис. 7. Изменение массы насыщенного пара в конце процесса всасывания при разном времени протекания (капельная схематизация)

Fig. 7. Change in the mass of saturated steam at the end of the suction process at different flow times (drip schematization)

На рис. 4 для выборочных режимов представлены результаты расчетов изменения массы насыщенного пара и жидкости во время процессов обратного расширения и всасывания. На рис. 5–7

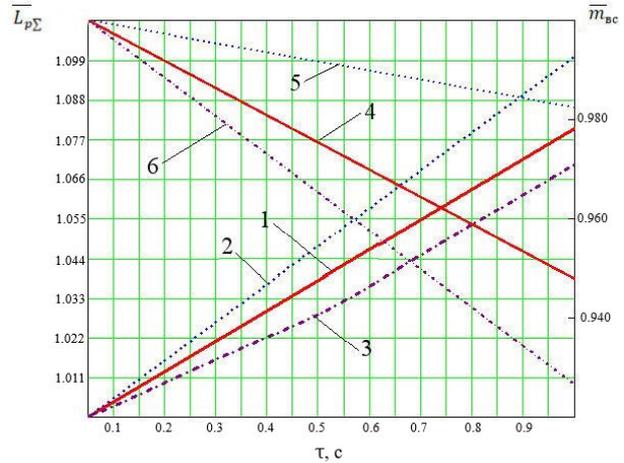


Рис. 8. Влияние времени протекания процессов обратного расширения и всасывания на относительную величину работы этих процессов (1 — пузырьковый режим; 2 — плёночный режим; 3 — капельный режим) и на относительную массу насыщенного пара, поступившую в рабочую камеру в процессе всасывания (4 — пузырьковый режим; 5 — плёночный режим; 6 — капельный режим)

Fig. 8. Influence of the time of the processes of reverse expansion and suction on the relative value of the work of these processes (1 — bubble mode; 2 — film mode; 3 — drip mode) and on the relative mass of saturated steam entering the working chamber during the suction process (4 — bubble mode; 5 — film mode; 6 — drip mode)

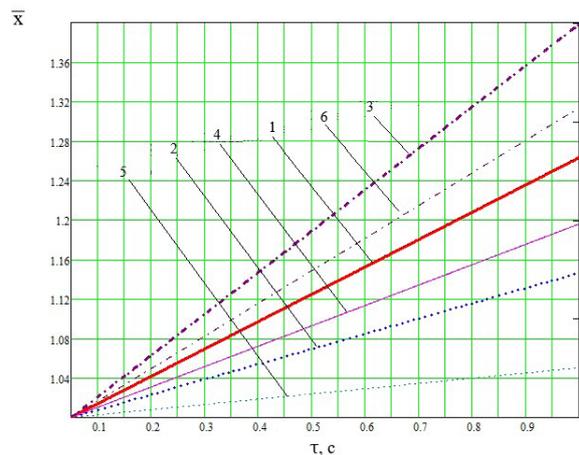


Рис. 9. Влияние времени протекания процессов обратного расширения и всасывания на относительную величину степени сухости аммиака в конце процесса всасывания (1 — пузырьковый режим; 2 — плёночный режим; 3 — капельный режим) и обратного расширения (4 — пузырьковый режим; 5 — плёночный режим; 6 — капельный режим)

Fig. 9. Influence of the time of the processes of reverse expansion and absorption on the relative value of the degree of dryness of ammonia at the end of the suction process (1 — bubble mode; 2 — film mode; 3 — drip mode) and reverse expansion (4 — bubble mode; 5 — film mode; 6 — drip mode)

представлено изменение суммарной массы насыщенного пара и массы свежей порции пара, поступившей в рабочую камеру в процессе всасывания, соответствующие окончанию процесса всасывания.

Как видно из представленных на рис. 5–7 результатов, суммарная масса насыщенного пара (линия с) при разном времени в конце процесса всасывания сходится в одну точку. Это можно объяснить следующим. При более медленном протекании про-

цесса всасывания (линия 3-1) масса насыщенного пара, поступившего из полости всасывания (линия b) в рабочую полость цилиндра меньше, чем при более быстром протекании процесса всасывания (линия 3-3). Эта разность масс насыщенного пара между суммарной массой (линия c) и всасываемой массой (линия b) при разном времени протекания процесса компенсируется массой испарившейся жидкости (линия a).

На рис. 8, 9 представлены наиболее значимые интегральные результаты, отражающие влияние выбора схематизации процесса теплоотдачи и времени протекания процессов обратного расширения и всасывания на относительную величину работы процессов обратного расширения и всасывания  $\left(\frac{L_{\tau_i}}{L_{0,05}} = \bar{L}_{p\Sigma}\right)$ , относительную величину массы пара, поступившей в рабочую камеру в процессе всасывания  $\left(\frac{m_{bc,\tau_i}}{m_{bc,0,05}} = \bar{m}_{bc}\right)$  и относительную величину степени сухости в конце процесса всасывания  $\left(\frac{x_{\tau_i}}{x_{0,05}} = \bar{x}\right)$ .

Как видно из представленных результатов, величина времени протекания рассматриваемых процессов (соответственно, и скорость поршня) существенно влияет на их интегральные характеристики. Так, при увеличении времени протекания процессов увеличивается суммарная работа расширения процессов обратного расширения и всасывания (примерно до 10 %), однако при этом уменьшается масса свежей порции рабочего тела, поступающей в рабочую камеру из камеры всасывания (примерно до 5 %), то есть снижается производительность компрессора (рис. 8). И то, и другое во многом объясняется изменением массы жидкой фазы, так как при более длительном процессе количество жидкой фракции становится меньше. Соответственно, при более длительных процессах степень сухости аммиака в конце процессов всасывания и обратного расширения выше, чем в случае более скоротечных процессов (рис. 9). Как и в предыдущих работах [12–13], полученные результаты во многом определяются выбором методики расчёта процессов теплообмена в рабочей камере; что позволяет оценивать лишь качественные результаты проведённых исследований.

### Заключение

Полученные результаты расчетных исследований совместно протекающих последовательных процессов обратного расширения и всасывания в аммиачной тихоходной длинноходовой поршневой компрессорной ступени, как и при отдельно протекающих процессах обратного расширения, рассмотренных ранее, выявили принципиально важное значение выбора типа схематизации методики расчёта процесса теплообмена. Так, при расчёте величины степени сухости аммиака в конце процесса всасывания расхождение количественных результатов для разных типов схематизации может составлять 10–25 % при малых скоростях движения поршня; при этом расхождение между относительными величинами работы расширения и массы свежей порции газа, поступившего в рабочую камеру из камеры всасывания, для разных типов схематизации составляет 3–5 %. При уменьшении времени протекания совместно протекающих процессов обратного расширения и всасывания расхождение

Таблица 1. Условные обозначения и индексы для формул  
Table 1. Symbols and indexes

Обозначение	Наименование	Единица измерения
$\lambda$	Коэффициент теплопроводности насыщенного пара	Вт/м <sup>2</sup> ·К
$\rho', \rho''$	Плотность насыщенной жидкости и насыщенного пара	кг/м <sup>3</sup>
$v', v''$	Удельный объем насыщенной жидкости и насыщенного пара	м <sup>3</sup> /кг
$r$	Удельная теплота парообразования	кДж/кг
$\nu''$	Коэффициент кинематической вязкости насыщенного пара	м <sup>2</sup> /с
$d$	Внутренний диаметр цилиндра	м
$t_{ст}$	Температура поверхности стенки	°С
$t$	Температура насыщенного пара	°С
Ga	Число Галилея [22–27]	
K	Критерий фазового перехода [22–27]	
Pr	Число Прандтля [22–31]	—
We	Число Вебера [22–27]	
Ra	Число Рейля [22–27, 29–31]	—
$L_{\tau_i}$	Работа процессов обратного расширения и всасывания при разном времени	Дж
$L_{0,05}$	Работа процессов обратного расширения и всасывания при времени протекания, равном 0,05 с	Дж
$\bar{L}_{p\Sigma}$	Относительная величина работы процессов обратного расширения и всасывания	
$x_{\tau_i}$	Степень сухости в конце процесса всасывания при разном времени	
$x_{0,05}$	Степень сухости в конце процесса всасывания при времени, равном 0,05 с	
$\bar{x}$	Относительная величина степени сухости в конце процесса всасывания	
$m_{bc,\tau_i}$	Масса пара, поступившая в рабочую камеру в процессе всасывания при разном времени	кг
$m_{bc,0,05}$	Масса пара, поступившая в рабочую камеру в процессе всасывания при времени, равном 0,05 с	кг
$\bar{m}_{bc}$	Относительная величина массы пара, поступившей в рабочую камеру в процессе всасывания	

между всеми рассмотренными величинами при расчёте при разных схематизациях становятся пренебрежимо малыми. Если погрешность в расчётах работы расширения и всасываемой массы аммиака в отдельных случаях можно считать допустимой,

то по отношению к расчёту величины степени сухости однозначного вывода сделать невозможно без оценки влияния этой величины на процесс сжатия и в целом на рабочий цикл рассматриваемого компрессора. Важным результатом проведённых исследований является выявленная зависимость перечисленных выше интегральных параметров от времени протекания рассматриваемых процессов, то есть от скорости поршня. Если при увеличении скорости поршня работа расширения снижается, то масса свежей порции всасываемого аммиака, то есть производительность и, соответственно, холодопроизводительность компрессора увеличиваются. В обоих случаях это изменение составляет в пределах 10 % (для рассмотренного диапазона режимных параметров компрессорной ступени). Конечная величина степени сухости изменяется ещё более существенно (до 15–40 % в зависимости от выбранного типа схематизации расчёта теплообмена), причём с увеличением быстроходности она уменьшается. Имеется очевидная взаимосвязь между изменением степени сухости и изменением массы свежей порции аммиака, что позволяет при необходимости разработать некоторые рекомендации по выбору режима реализации процессов обратного расширения и всасывания. Однако очевидно и то, что без расчёта полного рабочего цикла, протекающего в аммиачной тихоходной длинноходовой поршневой компрессорной ступени и реализуемых в области влажного пара, невозможно оценить влияние полученных результатов на её удельные характеристики, в том числе на индикаторный КПД и холодильный коэффициент.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 409 с.
2. Bosnjakovic F., Knoche K. F. Technische Thermodynamik: Teil I. Darmstadt; Steinkopff, 1998. 543 p.
3. Пекарев В. И., Иванова С. Н., Сафонова Н. А. Определение точки впрыска охлаждающей жидкости в винтовом компрессоре // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2015. № 2. С. 45–48.
4. Ahmed J. Hamad, Dooa Zaid Khalaf, Abdul Hadi N Khalifa. Performance Investigation of Vapor Compression Cycle with a Variable Speed Compressor and Refrigerant Injection // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 16. P. 63–76.
5. Wang B., Yang M., Dewitte P. [et al.]. Evaluation of methods to decrease the discharge temperature of R32 scroll compressor // International Compressor Engineering Conference at Purdue. 2014. 2371. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/iccec/2371> (дата обращения: 23.04.2022).
6. Lin J., Lian Y., Wu J. Numerical investigation on vapor-liquid two-phase compression in the cylinder of rotary compressors // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 170. 115022. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115022.
7. 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. P. 177–182. DOI: 10.1007/s10556-015-0020-5.
8. Yusha V. L., Den'gin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyj 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.
9. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Yu. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Vol. 53 (7-8). P. 453–458. DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2.
10. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyj A. V. Assessment of the relationship between the law of motion of the slow-speed long-stroke stage piston and the characteristics of the compressor unit drive // Oil and Gas Engineering (OGE-2019): AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141 (1). 030004. DOI: 10.1063/1.5122054.
11. Садвакасов Д. Х., Чернов Г. И., Юша В. Л. Анализ влияния факторов неопределенности 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.
12. 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 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.
13. 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.
14. 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.
15. Yusha V. L., Den'gin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyj 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.
16. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyj 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.
17. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyj 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.
18. 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.
19. Френкель М. И. Поршневые компрессоры: теория, конструкции и основы проектирования. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Машиностроение, 1969. 744 с.
20. Пластинин П. И., Твалчрелидзе А. К. Введение в математическое моделирование поршневых компрессоров. Москва: Изд-во МВТУ, 1976. 80 с.
21. CoolPack: программный комплекс для расчётов и построения моделей холодильных систем. URL: <https://soft.mudiv.net/win/files-CoolPack.html> (дата обращения: 13.05.2022).
22. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. Москва: Энергия, 1977. 344 с.
23. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. Москва: Энергия, 1967. 412 с.
24. Аметистов Э. В., Григорьев В. А., Эмцев Б. Т. [и др.]. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справ. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 512 с.
25. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен. Москва: Изд-во МЭИ, 2011. 558 с.

26. Брюханов О. Н., Шевченко С. Н. Теплообмен. Москва: ИНФРА-М, 2014. 463 с.

27. Кудинов А. А. Теплообмен. Москва: ИНФРА-М, 2012. 374 с.

28. 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.

29. Теоретические основы хладотехники. Ч. 2. Теплообмен / Под ред. Гуйго Э. И. [и др.]. Москва: Колос, 1994. 367 с.

30. 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.

31. Лабунцов Д. А. Обобщенные зависимости для теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. 1960. № 5. С. 76–81.

**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 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 быстроходности аммиачной тихоходной компрессорной ступени на процессы обратного расширения и всасывания в области влажного пара // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С. 49–57. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-49-57.

Статья поступила в редакцию 15.06.2022 г.

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

# THE ANALYSIS OF THE EFFECT OF HIGH-SPEED AMMONIA LOW-SPEED COMPRESSOR STAGE ON THE PROCESSES OF REVERSE EXPANSION AND SUCTION IN WET STEAM REGION

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

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

The paper presents a mathematical model of combined processes of reverse expansion and suction in the wet steam region, implemented in an ammonia low-speed long-stroke reciprocating compressor stage. 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; various options for implementing the methodology for calculating the heat exchange process in the working chamber of the stage are also considered. A computational and parametric analysis of the effect of the piston speed on the performance losses of the compressor stage and on the degree of dryness of ammonia at the end of the suction process is performed, taking into account the existing uncertainty factors both in terms of the choice of methods for calculating heat exchange processes and in terms of the choice of initial and initial conditions.

**Keywords:** reciprocating compressor stage, ammonia, wet steam, reverse expansion process, suction process, mathematical model, heat transfer coefficient.

## References

1. Kirillin V. A., Sychev V. V., Sheyndlin A. E. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Technical thermodynamics]. Moscow, 1983. 409 p. (In Russ.).
2. Bosnjakovic F., Knoche K. F. *Technische Thermodynamik: Teil I* [Engineering Thermodynamics: Part I]. Darmstadt: Steinkopff, 1998. 543 S. (In Germ.).
3. Pekarev V. I., Ivanova S. N., Safonova N. A. *Opredeleniye tochki vpryska okhlazhdayushchey zhidkosti v vintovom kompressore* [Definition of a point of injection of cooling liquid in the screw compressor] // *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovaniye»*. *Scientific Journal NRU Series «Refrigeration and Air Conditioning» ITMO*. 2015. No. 2. P. 45–48. (In Russ.).
4. Ahmed J. Hamad, Dooa Zaid Khalaf, Abdul Hadi N Khalifa. Performance Investigation of Vapor Compression Cycle with a Variable Speed Compressor and Refrigerant Injection // *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 16. P. 63–76. (In Engl.).
5. Wang B., Yang M., Dewitte P. [et al.]. Evaluation of methods to decrease the discharge temperature of R32 scroll compressor // *International Compressor Engineering Conference at Purdue*. 2014. 2371. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2371> (accessed: 23.04.2022). (In Engl.).
6. Lin J., Lian Y., Wu J. Numerical investigation on vapor-liquid two-phase compression in the cylinder of rotary compressors // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 170. 115022. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115022. (In Engl.).
7. 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. P. 177–182. DOI: 10.1007/s10556-015-0020-5. (In Engl.).
8. Yusha V. L., Den'gin V. G., Busarov S. S., Nedovenchanyj 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.).
9. Yusha V. L., Busarov S. S., Gromov A. Y. Assessment of the Prospects of Development of Medium-Pressure Single-Stage Piston Compressor Units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53 (7-8). P. 453–458. DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2. (In Engl.).
10. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyj A. V. Assessment of the relationship between the law of motion of the slow-speed long-stroke stage piston and the characteristics of the compressor unit drive // *Oil and Gas Engineering (OGE-2019): AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2141 (1). 030004. DOI: 10.1063/1.5122054. (In Engl.).
11. 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. Aviatsionno-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.).
12. 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. Aviatsionno-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.).
13. 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' 2 [The analysis of influence of uncertainty factors on mathematical modeling of process of reverse expansion of ammonia in low-speed reciprocating compressor stage. Part 2] // *Omskiy*

nauchnyy vestnik. Ser. Aviatzionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *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. (In Russ.).

14. 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.).

15. 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.).

16. Yusha V. L., Busarov S. S., Nedovenchanyi A. V., Titov D. S. Analysis of the efficiency of external cooling of slowspeed 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.).

17. 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.).

18. 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.).

19. Frenkel' M. I. Porshnevyye kompressory: teoriya, konstruksii i osnovy proyektirovaniya [Reciprocating compressors: theory, designs and design fundamentals]. 3 ed. Leningrad, 1969. 744 p. (In Russ.).

20. Plastinin P. I., Tvalchrelidze A. K. Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye porshnevykh kompressorov [Introduction to Mathematical Modeling of Reciprocating Compressors]. Moscow: MVTU Publ., 1976. 80 p. (In Russ.).

21. CoolPack: software package for calculations and building models of refrigeration systems. URL: <https://soft.mydiv.net/win/files-CoolPack.html> (accessed: 13.05.2022). (In Russ.).

22. Mikheyev M. A., Mikheyeva I. M. Osnovy teploperedachi [Heat Transfer Fundamentals]. 2 ed. Moscow: Energiya Publ., 1977. 344 p. (In Russ.).

23. Petukhov B. S. Teploobmen i soprotivleniyye pri laminarnom techenii zhidkosti v trubakh [Heat transfer and resistance in laminar fluid flow in pipes]. Moscow: Energiya Publ., 1967. 412 p. (In Russ.).

24. Ametistov E. V., Grigor'yev V. A., Emtsev B. T. [et al.]. Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskii eksperiment: sprav. [Heat and mass transfer. Thermotechnical experiment: handbook]. Moscow, 1982. 512 p. (In Russ.).

25. Tsvetkov F. F., Grigor'yev B. A. Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. Moscow, 2011. 558 p. (In Russ.).

26. Bryukhanov O. N., Shevchenko S. N. Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. Moscow, 2014. 463 p. (In Russ.).

27. Kudiniv A. A. Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. Moscow, 2012. 374 p. (In Russ.).

28. Panyulaytis A. S., Barabanov V. G., Vasil'yev P. S. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy isparitel'nogo

okhlazhdeniya metodicheskikh pechey s ispol'zovaniyem gidravlicheskih 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 VolgGTU. Izvestia VSTU*. 2021. No. 8 (255). P. 79–80. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-8-255-78-80. (In Russ.).

29. Teoreticheskie osnovy khladotekhniki. Ch. 2. Teplomassoobmen / [Theoretical foundations of cold technology. Part 2. Heat and mass transfer] / Ed. by E. I. Guigo [et al.]. Moscow, 1994. 367 p. (In Russ.).

30. Danilova G. N., Bogdanov S. N., Ivanov O. P. [et al.]. Teploobmennyye apparaty kholodil'nykh ustanovok [Heat exchangers of refrigeration units]. 2nd ed. Leningrad, 1986. 303 p. (In Russ.).

31. Labuntsov D. A. Obobshchennyye zavisimosti dlya teplootdachi pri puzyr'kovom kipenii zhidkostey [Generalized dependencies for heat transfer during nucleate boiling of liquids] // *Teployenergetika. Teployenergetika*. 1960. No. 5. P. 76–81. (In Russ.).

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

SPIN-code: 5444-8510

AuthorID (RSCI): 1013658

AuthorID (SCOPUS): 57191039081

Correspondence address: [dkhsadvakasov@omgtu.ru](mailto:dkhsadvakasov@omgtu.ru)

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

SPIN-code: 2144-5462

AuthorID (RSCI): 176943

AuthorID (SCOPUS): 56503369900

Correspondence address: [gi\\_chernov2002@mail.ru](mailto:gi_chernov2002@mail.ru)

**YUSHA Vladimir Leonidovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Refrigeration and Compressor Equipment 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](mailto:yusha@omgtu.ru)

#### For citations

Sadvakasov D. Kh., Chernov G. I., Yusha V. L. The analysis of the effect of high-speed ammonia low-speed compressor stage on the processes of reverse expansion and suction in wet steam region // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 49–57. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-49-57.

Received June 15, 2022.

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