

4249490

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

—  
Московское

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени  
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

---

НА ДОМ  
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Николай Константинович НИКУЛИН

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО  
ВАКУУМ-НАСОСА СО ВСТРЕЧНЫМ ВРАЩЕНИЕМ  
РАБОЧИХ КОЛЕС

(05.04.06 — Вакуумная техника)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —  
д. т. н., профессор Фролов Е. С.

Официальные оппоненты:  
д. т. н., профессор Бекнев В. С.,  
к. ф.-м. наук Макаров А. М.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан «      » 1974 г.

Защита диссертации состоится «      » 1975 г.

на заседании Совета факультета «Энергомашиностроение» МВТУ имени Н. Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, Лефортовская наб., дом 1, корпус факультета «Энергомашиностроение».

Ваши с      ые печатью,  
просьба

С д      теке МВТУ  
имени Н. Э. Баумана

Учен  
к. т.

*М 249490*

лонин В. И.

Дальнейшее развитие ряда отраслей промышленности таких, как: электронная, радиотехническая, атомная, металлургическая, авиационная и другие, предусмотренное решениями XXIV съезда КПСС, зависит от использования в них, для осуществления технологических процессов и обеспечения условий работы установок, высокопроизводительных средств откачки для создания и поддержания высокого и сверхвысокого вакуума, отличающихся надежностью в эксплуатации и не допускающими загрязнения откачиваемого объема. Этим требованиям, в частности, удовлетворяет турбомолекулярный вакуум-насос.

Турбомолекулярные вакуум-насосы (ТВН) находят в настоящее время широкое применение для создания давлений  $10^{-3} + 10^{-11}$  мм рт.ст. и меньше,

Повышение эффективности работы ТВН возможно за счет увеличения скорости вращения рабочих колес. В частности, увеличение относительной скорости вращения колес осуществляется в результате применения встречного вращения рабочих органов.

Основные задачи данной работы следующие:

1. Разработка конструкции ТВН со встречным вращением рабочих колес и теоретическое и экспериментальное исследование его эффективности.
2. Теоретическая оценка влияния трехмерного движения молекул на процесс перехода через межлопаточные каналы рабочего колеса ТВН в сравнении с двумерной теоретической моделью.
3. Разработка теоретической модели процесса перехода молекул газа через межлопаточные каналы рабочего колеса ТВН при взаимодействии их со стенками по закону Эйлера.
4. Теоретическое исследование различных моделей процесса перехода молекул газа через межлопаточные каналы рабочих колес ТВН со встречным вращением с целью определения оптимальных геометрических параметров.
5. Теоретическое исследование влияния осевого зазора между рабочими колесами на основные параметры откачной характеристики ступени ТВН с целью оптимизации расположения рабочих колес по пакету.
6. Экспериментальное исследование влияния различных геометрических параметров межлопаточного канала рабочего колеса и ступени ТВН на эффективность его работы при встречном вращении и проверка полученных теоретических зависимостей.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1249490

Никупин Н.К. Исследование

обзор

I.

В работе исследовался процесс перехода молекул газа при трехмерном движении, где перемещения молекул газа и канала (рис. I)

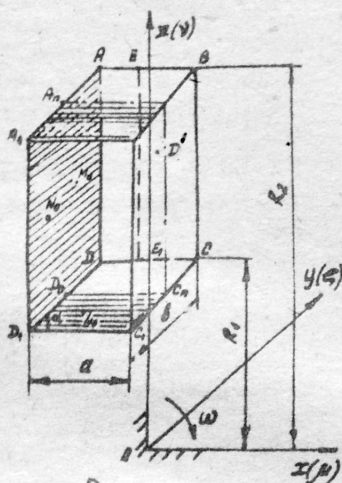


Рис. 1.

рассматривались относительно неподвижной системы координат. При этом предполагалось:

1. Распределение молекул по скоростям подчиняется закону Максвелла.
2. Взаимодействие молекул газа со стенками межлопаточного канала происходит с учетом диффузного закона (за преимущественное направление отражения принимается нормаль к поверхности).

Вероятность перехода молекул газа через межлопаточный канал со стороны всасывания I-I на сторону нагнетания II-II была представлена в виде суммы вероятности:

$$K_{I-II} = P(ABCD - A_1, A_n, D_n, D_1) + P(ABCD - A_1, A_n, C, D_1) + P(ABCD - L_1 - A_1, A_n, D_n, D_1) + P(ABCD - K_1 - A_1, A_n, D_n, D_1)$$

где  $P(ABCD - A_1, A_n, D_n, D_1)$  - вероятность попадания молекулы газа с входной поверхности  $ABCD$  межлопаточного канала на часть набегающей стенки  $A_1, A_n, D_n, D_1$ , отражаясь от которой, молекула перейдет на сторону II-II;

$P(ABCD - A_1, A_n, C, D_1)$  - вероятность перехода молекулы газа со стороны I-I на сторону II-II межлопаточного канала без соударений со стенками;

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

М В Т У  
№ 3. 620.112  
БИБЛИОТЕКА

$P(ABCD \rightarrow L_0 \rightarrow A_1 A_n D_n D_1)$  вероятность попадания молекулы газа с входной поверхности на часть набегающей стенки  $A_1 A_n D_n D_1$  после отражения в точке  $L_0$  поверхности  $CC_1 D_1 D$ ;

$P(ABCD \rightarrow K_0 \rightarrow A_1 A_n D_n D_1)$  вероятность попадания молекулы газа с входной поверхности на часть набегающей поверхности  $A_1 A_n D_n D_1$  после отражения в точке  $K_0$  поверхности  $AA_1 B_1 B$ .

Определив плотность распределения вероятности  $P(D' \rightarrow N_0)$  того, что молекула, вылетевшая из произвольной точки  $D'$  с координатами  $x_{D'}, y_{D'}, z_{D'}$  принадлежащей входному сечению  $ABCD$  межлопаточного канала в момент времени  $t = 0$ , столкнется с поверхностью набегающей стенки  $A_1 A D D_1$  в точке  $N_1$ , координаты которой  $\mu, \varphi, \nu$ :

$$P(D' \rightarrow N_0) = \frac{2}{\pi^{3/2}} \left[ \sin\left(\frac{\mu + \frac{\varphi}{2}}{V_n C_y} \omega t g \alpha\right) \left( \frac{\nu t g \alpha}{\mu + \frac{\varphi}{2}} + \frac{\mu \nu}{V_n C_y} \right) + \cos\left(\frac{\mu + \frac{\varphi}{2}}{V_n C_y} \omega t g \alpha\right) \times \right. \\ \times \left( \frac{\mu t g \alpha}{\mu + \frac{\varphi}{2}} - \frac{\nu \omega}{V_n C_y} \right) - \frac{x_{D'} t g \alpha}{\mu + \frac{\varphi}{2}} \left[ \sin\left(\frac{\mu + \frac{\varphi}{2}}{V_n C_y} \omega t g \alpha\right) \left( \frac{\nu \omega}{V_n C_y} - \frac{\mu t g \alpha}{\mu + \frac{\varphi}{2}} \right) + \right. \\ \left. + \cos\left(\frac{\mu + \frac{\varphi}{2}}{V_n C_y} \omega t g \alpha\right) \left( \frac{\mu \nu}{V_n C_y} + \frac{\nu t g \alpha}{\mu + \frac{\varphi}{2}} \right) - \frac{z_{D'} t g \alpha}{\mu + \frac{\varphi}{2}} \right] \times \exp\left\{ - \frac{C_y^2}{(\mu + \frac{\varphi}{2})^2 t g^2 \alpha} \times \right. \\ \left. \left[ x_{D'}^2 + z_{D'}^2 + \frac{\mu^2}{\cos^2 \alpha} + \mu \alpha t g^2 \alpha + \nu^2 + \frac{\alpha^2}{4} t g^2 \alpha \right] \right\} \times \exp\left\{ \frac{C_y^2}{(\mu + \frac{\varphi}{2})^2 t g^2 \alpha} 2 x_{D'} \nu \times \right. \\ \left. \times \sin\left(\omega \frac{\mu + \frac{\varphi}{2}}{C_y V_n} t g \alpha\right) \right\} \times \exp\left\{ - \frac{C_y^2}{(\mu + \frac{\varphi}{2})^2 t g^2 \alpha} \left[ 2 x_{D'} \mu \cos\left(\omega \frac{\mu + \frac{\varphi}{2}}{C_y V_n} t g \alpha\right) - 2 z_{D'} \nu \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \cos\left(\omega \frac{\mu + \frac{\varphi}{2}}{V_n C_y} t g \alpha\right) \right] \right\} \times \exp\left\{ - \frac{C_y^2}{(\mu + \frac{\varphi}{2})^2 t g^2 \alpha} \left[ 2 z_{D'} \mu \sin\left(\omega \frac{\mu + \frac{\varphi}{2}}{V_n C_y} t g \alpha\right) \right] \right\},$$

где

$\omega$  - угловая скорость движения рабочего колеса;

$C_y$  - отношение составляющей скорости теплового движе-

ния молекулы газа в направлении оси  $OY$  к тангенциальной скорости  $V_n$ , определялась вероятностью

$P(ABCD \rightarrow A_1 A_n D_n D_1)$ , для чего необходимо проинтегрировать

$P(D' \rightarrow N_0)$  по поверхности входного сечения  $ABCD$ , и диапазону изменения  $C_y$ , и по части поверхности набегающей стенки  $A_1 A_n D_n D_1$ ;

$$P(ABCD \rightarrow A_1 A_n D_n D) = \iiint_{ABCD(C_y)} \iiint_{A_1 A_n D_n D} P(\vec{D} \rightarrow N_0) \frac{d\rho dv dc_y dx_2 dz_2}{R_2^2 a (1-\lambda)^2 \cos \alpha}$$

где  $R_2$  - внешний радиус рабочего колеса;  
 $\lambda$  - отношения начального радиуса  $R_1$  межлопаточного канала к  $R_2$

$$\lambda = \frac{R_1}{R_2}$$

Аналогично, определив плотности распределения вероятности попадания молекулы из точки  $D'$  в произвольную точку выходного сечения межлопаточного канала  $A_1 B_1 C_1 D_1$ , либо дна  $CC_1 D_1 D$ , или части корпуса ТВН, ограждающего межлопаточный канал,  $AA_1 B_1 B$  и проинтегрировав по соответствующим поверхностям и диапазону изменения  $C_y$ , где  $C_y$  - отношение составляющей  $V_y$  скорости теплового движения в направлении оси  $OY$  к наиболее вероятной скорости  $V_n$ ,  
 $C_y = \frac{V_y}{V_n}$ , определялись остальные слагаемые вероятности  $K_{TON}$ :

$$P(ABCD \rightarrow A_1 B_1 C_1 D_1), P(ABCD \rightarrow C_1 C_1 D_1 D), P(ABCD \rightarrow K_0 \rightarrow A_1 A_n D_n D_1).$$

Вероятность перехода молекул газа  $K_{EON}$  через межлопаточный канал рабочего колеса со стороны II-II на сторону I-I определялась теми же самыми выражениями, что и  $K_{TON}$ , но при противоположном направлении вращения рабочего колеса ( $-\omega$ ). Зная величины  $K_{TON}$  и  $K_{EON}$  коэффициент  $K_{0\max N}$ , учитывающий разность вероятностей перехода молекул газа с одной стороны межлопаточного канала на другую:

$$K_{0\max N} = K_{TON} - K_{EON} \quad \text{и}$$

$$C_{0\max N} = \frac{K_{TON}}{K_{EON}}$$

Основное отличие, возникающее при рассмотрении явления перехода молекул газа через межлопаточный канал, между результатами исследований при двумерном и трехмерном движении молекул обусловлено влиянием поверхностей  $CC_1 D_1 D$  и  $AA_1 B_1 B$ , ограничивающими высоту межлопаточного канала. Но влияние этих поверхностей,

$P(ABCD \rightarrow C_1 C_1 D_1 D)$  и  $P(ABCD \rightarrow K_0 \rightarrow A_1 A_n D_n D_1)$ , на процесс перехода молекул газа через межлопаточный канал мало (менее 5%) вследствие того, что: молекула, при попадании на поверхности  $CC_1 D_1 D$  и  $AA_1 B_1 B$ , чтобы перейти на сторону II-II должна еще попасть на поверхность  $AA_1 D_n D_1$ ; величина площади поверхностей  $A_1 A_n B_1 B$  и  $C_1 C_n D_n D_1$  ( $\alpha^2 \sin^2 \alpha$ ) пренебрежимо мала по сравнению с поверхностями  $A_1 A_n D_n D_1$  и  $A_1 B_1 C_1 D_1$  [ $\alpha R_2^2 (1-\lambda) (1+\cos \alpha)$ ].

Теоретический анализ трехмерной теоретической модели приводит к уравнениям, не решаемым аналитически, теоретический анализ которых затруднен в то время, как различие между экспериментальными данными и результатами при определении основных параметров откачной характеристики рабочего колеса по уравнениям, полученным на основании рассмотрения двумерной теоретической модели, составляет не более 10%.

Аналогичная ошибка будет иметь место и при сравнении результатов в определении результирующей вероятности из рассмотрения теоретических моделей перехода молекул газа через межлопаточный канал для двумерного и трехмерного движения при зеркальном законе отражения.

Таким образом, для определения основных параметров откачной характеристики рабочего колеса ТНН, процесс перехода молекул газа через межлопаточный канал может рассматриваться на основании двумерного движения. При этом сущность явления перехода молекул газа через межлопаточный канал не искажается.

## П.

Из теоретической двумерной модели перехода молекул газа через межлопаточный канал рабочего колеса ТНН при отражении молекул от стенок канала по закону Эйлера вероятности определялись в виде (рис.2):

$$K_{I2} = K_{I1} + K_{I1} \cdot K_{II2} + K_{I2} \cdot K_{2II1} ,$$

$$K_{II2} = K_{II1} + K_{II1} \cdot K_{I12} + K_{II2} \cdot K_{2I1} ,$$

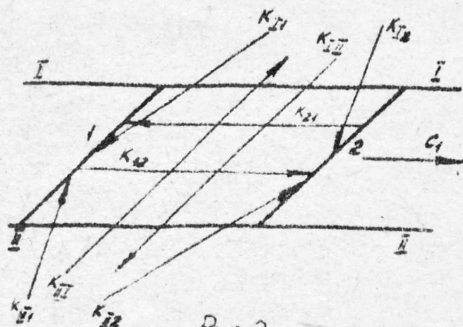


Рис 2

где  $K_{I2}$  ( $K_{II2}$ ) - вероятность перехода молекул газа через межлопаточный канал со стороны всасывания I-I на сторону нагнетания II-II (со стороны II-II на сторону I-I) при отражении молекул газа от поверхности твердого тела по закону Эйлера;

$K_{ij}$  - вероятность перехода молекул газа с поверхности  $i$  межлопаточного

канала на поверхность, без промежуточных столкновений;

$K_{ij\kappa}$  - вероятность перехода молекулы газа с поверхности  $i$  на поверхность  $j$  как без столкновений, так и после возможных промежуточных столкновений с поверхностями межлопаточного канала;

$K_{ij} \cdot K_{j\kappa}$  - вероятность перехода молекул газа с поверхности  $i$  на поверхность  $\kappa$  в случае, если первоначально молекула попала на поверхность  $j$ ;

$i, j = 1$  - набегающая поверхность межлопаточного канала;

$i, j = 2$  - противоположная набегающей поверхность межлопаточного канала.

При определении слагаемых вероятностей  $K_{12}$  и  $K_{22}$  вся область изменения скоростей теплового движения молекул ( $0 \rightarrow \infty$ ) разбивалась на две подобласти ( $0, C_1$ ) и ( $C_1, \infty$ ), где

$C_1$  - отношение скорости движения межлопаточного канала  $u$  к наиболее вероятной скорости  $V_H$ ,  $C_1 = \frac{u}{V_H}$ , и в каждой из этих подобластей принималось, что молекулы обладают средней скоростью соответственно  $C_1 \cdot c_p$  и  $C_2 \cdot c_p$

По известным величинам  $K_{12}$  и  $K_{22}$  определялись коэффициент  $K_{max\ 2} = K_{12} - K_{22}$  и  $\epsilon_{max\ 2} = \frac{K_{12}}{K_{22}}$ .

Из анализа теоретических зависимостей для определения основных параметров откачной характеристики, при взаимодействии молекул газа с поверхностями межлопаточного канала по закону Эйлера и сравнения полученных данных с результатами расчета при взаимодействии с учетом и зеркального и диффузного отражения получено, что при относительно узких каналах ( $\frac{g}{\delta} = 0,4$ ) оптимальное значение угла  $\alpha_{opt} = 30^\circ \div 40^\circ$  для зависимости  $K_{max} = f(\alpha)$  лежит в пределах  $35^\circ \div 40^\circ$ ; при отношении  $\frac{g}{\delta} = 1,0$   $\alpha_{opt} = 30^\circ \div 40^\circ$ , также как и при  $\frac{g}{\delta} = 1,6$

Анализ теоретических зависимостей  $K_{max} = f(\frac{g}{\delta})$  позволял определить оптимальное отношение  $(\frac{g}{\delta})_{opt}$ , при котором  $K_{max}$  имеет наибольшее значение. Так при  $\alpha = 10 \div 30^\circ$  ( $\frac{g}{\delta})_{opt} = 1,2$ ; при  $\alpha = 50^\circ$  - ( $\frac{g}{\delta})_{opt} = 1,6$ .

В результате теоретического анализа процесса перехода молекул газа через межлопаточный канал рабочего колеса ТВН при определении  $K_{max}$  получены также те же величины  $\alpha_{opt} = 35^\circ \div 40^\circ$

и  $\frac{g}{\delta} = 1,2 \div 1,4$ , как и для других законов отражения, т.е. оптимальная величина  $\Phi_{opt}$  и  $(\frac{g}{\delta})_{opt}$  практически не зависит от

выбора закона отражения при теоретическом исследовании процесса перехода молекул через межлопаточный канал.

В результате теоретического анализа влияния скорости движения  $C$ , межлопаточного канала получено, что с увеличением скорости  $C$ , увеличивается и  $K_{max}$  и  $T_{max}$ .

### III.

В работе проведены теоретическое и экспериментальное исследования влияния осевого зазора на эффективность работы ступени ТВН со встречным вращением рабочих колес.

Из-за наличия между соседними рабочими колесами ТВН осевого зазора влияние скорости движения межлопаточного канала на процесс перехода молекул газа через канал, попадающих во входное сечение рабочего колеса с различных поверхностей пространства между колесами, различно.

При рассмотрении влияния осевого зазора на эффективность работы ступени ТВН со встречным вращением рабочих колес принималось, что в пространстве между рабочими колесами сохраняется Максвелловское распределение молекул по скоростям теплового движения, тогда во входное сечение рабочего колеса попадает  $\nu$  молекул газа,

$$\nu = \frac{1}{4} n V_a F,$$

где  $n$  - число молекул в единице объема;  $V_a$  - средняя арифметическая скорость теплового движения молекул газа;  $F$  - торцовая площадь входного сечения межлопаточных каналов рабочего колеса ТВН. Причем часть  $\nu_1$  из них попадает с поверхности вала, на котором расположено рабочее колесо, имеющего угловую скорость вращения  $\omega_1$ ; часть  $\nu_2$  - с поверхности соседнего рабочего колеса, вращающегося в противоположном направлении с угловой скоростью  $\omega_2$ ; часть  $\nu_3$  - с поверхности корпуса внешнего ротора, который также вращается в противоположном направлении с угловой скоростью  $\omega_3$ . Тогда очевидно:  $\nu = \nu_1 + \nu_2 + \nu_3$ .

Обозначив соответственно вероятности попадания молекул газа во входное сечение рабочего колеса: с поверхности вала -  $K_1$ , с поверхности соседнего рабочего колеса -  $K_2$ , с поверхности корпуса внешнего ротора -  $K_3$ , были определены относительные количества молекул:

$$\frac{\nu_1}{\nu} = \frac{K_1}{K_1 + K_2 + K_3}; \quad \frac{\nu_2}{\nu} = \frac{K_2}{K_1 + K_2 + K_3}; \quad \frac{\nu_3}{\nu} = \frac{K_3}{K_1 + K_2 + K_3}.$$

Вероятность перехода  $K'_I$  молекул газа со стороны всасывания I-I на сторону нагнетания П-П рабочего колеса, с учетом влияния осевого зазора, равна:

$$K'_I = (K_{I0A} \cdot K_1 + K_{IAC} \cdot K_2 + K_{ISC} \cdot K_3) \frac{1}{K_1 + K_2 + K_3},$$

где  $K_{I0A}$  - вероятность перехода доли  $\frac{1}{2}$  молекул со стороны I-I рабочего колеса на сторону П-П при скорости  $(C_1 - C_{0A})$ ;

$C_{0A}$  - отношение линейной скорости движения участка вала и наимвероятной скорости теплового движения молекул;

$K_{IAC}$  - вероятность перехода доли  $\frac{1}{2}$  молекул со стороны I-I рабочего колеса на сторону П-П при скорости  $(C_1 + C_{AC})$ ;

$C_{AC}$  - отношение средней линейной скорости движения поверхности соседнего рабочего колеса и наимвероятной скорости теплового движения молекул газа;

$K_{ISC}$  - вероятность перехода доли  $\frac{1}{2}$  молекул со стороны I-I рабочего колеса на сторону П-П при скорости  $(C_1 + C_{SC})$ ;

$C_{SC}$  - отношение линейной скорости движения участка внешнего ротора и наимвероятной скорости теплового движения молекул газа.

Аналогично была определена вероятность  $K'_H$ :

$$K'_H = (K_{H0A} \cdot K_1 + K_{HAC} \cdot K_2 + K_{HSC} \cdot K_3) \frac{1}{K_1 + K_2 + K_3},$$

где  $K_{H0A}$ ,  $K_{HAC}$ ,  $K_{HSC}$  - вероятности перехода соответственных долей молекул со стороны П-П рабочего колеса на сторону I-I при скоростях соответственно  $(C_0 - C_{0A})$ ,  $(C_0 + C_{AC})$ ,  $(C_0 + C_{SC})$ .

По значениям  $K'_I$  и  $K'_H$  определялись коэффициенты

$$K'_{\text{тот}} = K'_I - K'_H \quad \text{и} \quad \epsilon'_{\text{тот}} = \frac{K'_I}{K'_H}.$$

Аналогичным образом были определены и основные параметры откачной характеристики соседнего рабочего колеса.

Приведенный анализ теоретических зависимостей для определения влияния осевого зазора на основные параметры откачной характеристики рабочего колеса показал, что при увеличении относительной величины осевого зазора  $\delta'_0 = \frac{\delta_{0c}}{K_0}$ , где  $\delta_{0c}$  - абсолютная вели-

чина осевого зазора, возрастает доля молекул  $\frac{V_1}{V}$  и  $\frac{V_2}{V}$  и уменьшается  $\frac{V_3}{V}$  в результате возрастания влияния площадей участков вала и корпуса внешнего ротора при неизменной площади поверхности соседнего рабочего колеса.

Так при увеличении  $\delta_o$  от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $1 \cdot 10^{-1}$  ( $\delta_{oc} = 1,5 \text{ мм}$  до  $15 \text{ мм}$  при  $R_2 = 150 \text{ мм}$ ) между рабочими колесами с  $\lambda_o = R_o/R_2 = 0,3$ , где  $R_o$  - радиус вала,  $\lambda = 0,7$ ,  $\frac{V_1}{V}$  возрастает в 10,8 раз (от  $1,3 \cdot 10^{-3}\%$  до  $1,4 \cdot 10^{-2}\%$ );  $\frac{V_2}{V}$  уменьшается в 1,12 раза (от 98,8% до 88%);  $\frac{V_3}{V}$  увеличивается в 10 раз (от 1,2% до 12%), что соответствует изменению вероятностей:  $K_1$  возрастает от  $1,09 \cdot 10^{-5}$  до  $8,58 \cdot 10^{-4}$ ;  $K_2$  уменьшается от  $8,46 \cdot 10^{-1}$  до  $5,63 \cdot 10^{-1}$ ;  $K_3$  возрастает от  $1,06 \cdot 10^{-2}$  до  $7,66 \cdot 10^{-2}$ .

При изменении  $\lambda_o$  от 0,3 до 0,7 и  $\lambda$  от 0,3 до 0,9 в ступени с  $\delta_o = 1 \cdot 10^{-2}$  доля молекул  $\frac{V_2}{V}$  превышает 96%.

Из сравнения относительных количеств  $\frac{V_1}{V}$ ,  $\frac{V_2}{V}$ ,  $\frac{V_3}{V}$  молекул газа, попадающих во входное сечение рабочего колеса, получено, что при  $\delta_o < 4 \cdot 10^{-2}$  ( $\delta_{oc} = 6 \text{ мм}$  при  $R_2 = 150 \text{ мм}$ ) более 95% от всего количества молекул газа  $\frac{V}{V}$  составляет доля  $\frac{V_2}{V}$ , т.е. увеличение  $\delta_o$  до  $4 \cdot 10^{-2}$  не приводит к ухудшению откачных характеристик ТНН вместе с тем значительно упрощает технологию сборки.

Таким образом, при  $\delta_o < 4 \cdot 10^{-2}$  влиянием осевого зазора на эффективность работы ТНН можно пренебречь, а его абсолютную величину можно выбирать из конструкторско-технологических условий.

С целью проверки результатов теоретического анализа влияния осевого зазора на откачные характеристики пакета ТНН, состоящего из трех рабочих колес, определялись экспериментальные характеристики при различных величинах осевого зазора:  $\delta_o = 6,9 \cdot 10^{-3}$ ,  $1,38 \cdot 10^{-1}$  ( $\delta_{oc} = 1 \text{ мм} + 20 \text{ мм}$  при  $R_2 = 150 \text{ мм}$ ) и  $\lambda = 0,475$ ;  $0,621$ ;  $0,7$ .

Сравнение результатов теоретического и экспериментального исследования влияния осевого зазора на откачные характеристики ТНН дало удовлетворительное совпадение, расхождение менее 10%.

Наибольшее расхождение (до 10%) между теоретическими и экспериментальными данными в определении  $\delta_{oc}$  и  $\tau_{max}$  при уменьшении осевого зазора от  $2,76 \cdot 10^{-2}$  до  $6,9 \cdot 10^{-3}$  ( $1 + 4 \text{ мм}$  при  $R_2 = 150 \text{ мм}$ ) в результате стеснения входа в межлопаточный канал поверхностью лопаток соседнего рабочего колеса, что приводит к уве-

личению сопротивления при переходе молекул с одной стороны рабочего колеса на другую, вызывая незначительное (до 10%) увеличение  $\zeta_{\text{тех}}$  и уменьшение  $\zeta_{\text{мех}}$ .

Таким образом, результаты экспериментального исследования подтверждают данные теоретического анализа, что влиянием осевого зазора, при  $\delta_0 < 4 \cdot 10^{-2}$ , можно пренебречь, а его абсолютную величину можно выбирать из конструкторско-технологических условий.

#### IV.

Экспериментальное исследование работы ТВН со встречным вращением рабочих колес проводилось на установке, состоящей: из экспериментального ТВН с двумя вращающимися в противоположные стороны роторами, один из которых вращается внутри другого при помощи отдельных электродвигателей постоянного тока, позволяющих менять скорости вращения роторов; насосов предварительного разрежения, с помощью которых в проточной части ТВН устанавливался молекулярный режим течения газа; измерительной аппаратуры. Экспериментальный стенд позволил определить основные параметры откачных характеристик различных пакетов рабочих колес ТВН.

Измерение потока газа, откачиваемого ТВН, проводилось методом постоянного давления, с помощью измерительной бюретки; замер давления на стороне всасывания и нагнетания осуществлялся с помощью ионизационных преобразователей ДМ-2 вакуумметрами ВИТ-1А и ВИТ-2.

При теоретическом определении оптимальных геометрических размеров межлопаточных каналов рабочего колеса ТВН со встречным вращением рабочих органов предполагалось, что процесс перехода молекул газа через межлопаточный канал описывается теми же самыми теоретическими зависимостями, как и для ТВН с неподвижным "статором", но для скорости относительного движения рабочих колес.

С целью проверки данного предположения были проведены экспериментальные исследования по определению откачных характеристик

$S = f(\tau)$  ступени ТВН как в режиме встречного вращения рабочих колес, так и в режиме с неподвижным "статором" при различных скоростях относительного движения рабочих колес,  $C_1 = 0,067 \pm 0,4$ , и при различной геометрии межлопаточных каналов:  $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ$  и  $\frac{z}{\delta} = 0,33; 0,5; 0,67; 0,84; 1,0; 1,33; 1,5$ .

В результате экспериментального исследования было получено, что основные параметры откачных характеристик ступени рабочих колес ТВН в режиме встречного вращения и в режиме с неподвижным "статором"

практически не отличаются друг от друга для одинаковых относительных скоростей движения рабочих колес, расхождение не превышало 3%.

Экспериментальное исследование влияния геометрических параметров межлопаточного канала ( $\alpha$  - угол наклона паза;  $\frac{a}{b}$  - отношение ширины  $a$  межлопаточного канала  $K$  по длине  $b$ ) на откатные характеристики ТВН со встречным вращением рабочих колес дало удовлетворительное совпадение с расчетными данными, полученными по теоретической модели перехода молекул через канал с учетом и зеркального и диффузного законов отражения, расхождение не превышало 7% при сравнении быстроты откатки и 6% при сравнении по  $\tau_{max}$ . Расхождение с теоретической моделью при отражении по закону Эйлера достигало 50% и 75% соответственно в скорости откатки и  $\tau_{max}$ .

Таким образом, процесс перехода молекул газа через межлопаточный канал рабочего колеса ТВН со встречным вращением рабочих органов с удовлетворительной точностью описывается теоретической моделью с учетом и зеркального и диффузного законов отражения ( $\sim 7\%$ ). Теоретическая модель при отражении молекул по закону Эйлера может быть использована, ввиду относительной простоты ее уравнений, для приближенного определения основных параметров откатной характеристики.

При теоретическом и экспериментальном исследовании работ ступени колес ТВН были получены уравнения откатной характеристики и ее основных параметров  $S_{max ст}$  и  $\tau_{max ст}$ , позволяющие определить влияние основных параметров откатных характеристик каждого из рабочих колес на откатную характеристику ступени. Так для пакета из двух рабочих колес

$$S_{max ст} = \frac{S_{max 1} (\tau_{max ст 1})}{\tau_{max ст} - \tau_{max 2} + \frac{S_{max 1}}{S_{max 2}} (\tau_{max 2} - 1)};$$

где  $S_{max ст}$ ;  $S_{max 1}$ ;  $S_{max 2}$  - максимальная скорость откатки: ступени из двух рабочих колес; первого рабочего колеса; второго рабочего колеса соответственно;

$\tau_{max ст}$ ,  $\tau_{max 1}$ ,  $\tau_{max 2}$  - максимальное отношение давлений, создаваемое: ступенью ТВН из двух рабочих колес; первым рабочим колесом; вторым рабочим колесом, при скорости откатки равной нулю.

В результате теоретического и экспериментального исследования влияния откачных характеристик рабочих колес на откачную характеристику ступени ТНН получено, что на стороне всасывания пакета должно располагаться рабочее колесо с повышенной быстротой откачки. Остальные рабочие колеса подбираются из условия согласованной работы колес.

#### Основные выводы.

I. Спроектирован, изготовлен и исследован экспериментальный ТНН со встречным вращением рабочих колес.

II. Проведена теоретическая оценка влияния трехмерного движения на процесс перехода молекул газа через межлопаточные каналы рабочего колеса ТНН в сравнении с двумерной теоретической моделью. Установлено, что теоретический анализ трехмерной модели приводит к уравнениям, не решаемым аналитически, теоретический анализ которых затруднен, в то время, как различие между экспериментальными данными и результатами при определении основных параметров откачной характеристики рабочего колеса по уравнениям, полученным на основании рассмотрения двумерной теоретической модели, составляет не более 10%.

III. Разработана теоретическая модель процесса перехода молекул газа через межлопаточные каналы рабочего колеса ТНН при взаимодействии их со стенками межлопаточного канала по закону Эйлера. Исследование зависимости основных параметров откачной характеристики рабочего колеса от основных геометрических размеров межлопаточного канала дало удовлетворительное качественное совпадение с полученными по другим теоретическим моделям. Однако количественное расхождение составило до 50% в  $K_{max}$  и до 75% в  $S_{max}$  в диапазоне практически применяемых скоростей  $C_0 \leq 1$ . Полученные уравнения для определения  $S_{max}$  и  $C_{max}$  могут быть использованы в приближенных расчетах.

IV. В результате теоретического и экспериментального анализа влияния геометрических параметров межлопаточного канала на откачную характеристику рабочих колес ТНН со встречным вращением установлено:

I. Для повышения  $S_{max}$  рабочего колеса ТНН со встречным вращением рабочих органов, как и для ТНН с неподвижным "статором", следует применять межлопаточные каналы  $\alpha = 35^{\circ} + 40^{\circ}$  и  $\frac{a}{b} = 1,2 + 1,4$ .

2. Для повышения  $\zeta_{\text{max}}$  на рабочем колесе ТВН со встречным вращением рабочих органов, как и для ТВН с неподвижным "статором", следует применять межлопаточные каналы  $\alpha = 10^\circ + 15^\circ$  и  $\frac{S}{\delta} = 0,6 + 0,8$ .

У. Разработана теоретическая модель по определению влияния осевого зазора на основные параметры откачной характеристики рабочего колеса в ступени ТВН. В результате теоретического анализа установлено, что при величине относительного осевого зазора  $\delta_{\text{отн}} < 4 \cdot 10^{-3}$  его влиянием можно пренебречь, т.к. максимальное расхождение значений  $\zeta_{\text{max}}$  и  $S_{\text{max}}$  рабочих колес не превышает 10% в диапазоне  $\delta_{\text{отн}} = 6 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-2}$ .

УІ. Получены теоретические зависимости параметров откачной характеристики ступени ТВН, состоящей из рабочих колес с различными геометрическими параметрами.

УІІ. Проведено экспериментальное исследование ступени ТВН со встречным вращением рабочих органов с целью проверки результатов теоретического исследования влияния геометрических параметров межлопаточного канала, осевого зазора между рабочими колесами,  $S_{\text{max}}$  и  $\zeta_{\text{max}}$  рабочих колес на откачную характеристику ступени ТВН со встречным вращением рабочих колес. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышало 10%.

Содержание основных положений диссертации изложено в следующих работах:

І. Фролов Е.С., Никулин Н.К. "Результаты исследования турбомолекулярного вакуум-насоса со встречным движением рабочих органов". Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по физике и технике высокого вакуума. 1971 г.

2. Фролов Е.С., Демихов К.Е., Никулин Н.К., Кузнецов В.П. "Экспериментальное исследование влияния осевых зазоров на характеристику ступени турбомолекулярного вакуум-насоса" ЦИНТИХИМ-НЕФТЕМАШ, № 2, 1971 г.

3. Лубенец В.Д., Фролов Е.С., Демихов К.Е., Никулин Н.К., Кузнецов В.П. "Теоретическая эффективность рабочего колеса турбомолекулярного вакуум-насоса с учетом диффузного закона взаимодействия молекул газа со стенками межлопаточного канала". Известия ВУЗов. "Машиностроение" № 6, 1971 г.

4. Кузнецов В.П., Никулин Н.К., Полосов В.В., Переславцев А.В.  
"Экспериментальный стенд для исследования турбомолекулярного вакуум-насоса со встречным вращением рабочих органов. Труды МВТУ  
№ 158. "Компрессорные и вакуумные машины и пневмоагрегаты" 1973 г.