

5...45%, среднее квадратичное отклонение результата измерения влажности молотого зерна не превышает  $\pm 0,03\%$ .

Образцовая установка позволяет методом непосредственных сличений результатов измерений влажности зерна проверить диапазон измерений и основную погрешность вакуумно-тепловых установок 1-го разряда, эксплуатируемых производителем лабораторных СВЧ-влажномеров научно-производственным предприятием «Микрорадар» (г. Минск), а также головными органами ведомственных метрологических служб Госстандарта РБ и РФ. Погрешность измерения влажности УВТО  $\pm 0,1 - 0,2\%$  при диапазоне 5 - 45% влажности. В свою очередь, вакуумно-тепловая установка 1-го разряда позволяет также методом непосредственных сличений поверять влагометрические установки 2-го разряда, основанные на методе высушивания проб зерна при атмосферном давлении по ГОСТ 29027 - 91 (погрешность таких установок 0,3...0,8%), а также лабораторные СВЧ-влажномеры зерна серии «Микрорадар» (абсолютная погрешность измерения которых в диапазоне 8...35% составляет  $\pm 0,35\%$ ).

В качестве образцовых средств измерений, заимствованных из других поверочных схем, на рис. 4 показаны образцовые меры емкости по ГОСТ 8.371 - 90 и ГОСТ 8.267 - 87 (для поверки емкостных высокочастотных влагомеров), а также образцовые меры сопротивления (для поверки резистивных или кондуктометрических влагомеров) по ГОСТ

8.028 - 89 и другие средства (секундомеры, термометры и др.). Пределы допускаемых значений относительной погрешности мер емкости не должны превышать 0,1%, мер сопротивления - 0,01%.

При построении поверочных схем влагомеров других материалов в них могут быть включены специально созданные для целей поверки и дополнительного контроля в межповерочный интервал имитаторы физических свойств влажного материала, как, например, в случае с измерителем влажности «Микрорадар -101». Такие имитаторы могут входить в комплект поставки прибора.

Изложенное выше показывает важность разработки современных методов поверки влагомеров и их стандартизации. Без решения вопросов метрологического обеспечения процессов измерения влажности невозможно обеспечить единство измерений и достоверность получаемых результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романов В.Г. Поверка влагомеров твердых веществ. - М.: Изд-во стандартов, 1983. - 176с.
2. Лисовский В.В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. - Мн.: БГАТУ, 2005. - 292с.

УДК 621.521:664

# ГИДРОАЭРОДИНАМИКА ЩЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ ВОЗДУХА ВАКУУМНОГО НАСОСА

**М.В. Колончук, инженер (РУП «Минскэнерго»)**

Производительность ротационных вакуумных насосов, применяемых для доения коров на молочно-товарных фермах, в процессе работы снижается. Основная причина снижения производительности - увеличение торцовых зазоров. Зазоры между деталями в рабочем пространстве вакуумного насоса образуют щели малой высоты (рис. 1,а). Протечки воздуха через зазоры составляют значительную часть производительности насоса. Относительная величина протечек определяет значения

коэффициента откачки, удельной мощности, коэффициента полезного действия и вид характеристик насосов. Изучению движения воздуха в щелях посвящен целый ряд работ. Определение расхода воздуха через щель по любой из существующих методик является довольно громоздким и трудоемким. Объективно существующие закономерности, разграничивающие ламинарный или турбулентный характер движения, докритическое или критическое истечение воздуха, вынуждают использовать

различные аналитические зависимости или графики. Точные способы определения фактической величины зазоров в рабочем состоянии вакуумного насоса отсутствуют. Отсутствие приемлемых решений сложных задач по расчету протечек, возникающих в реальных условиях, позволяет утверждать, что в настоящий момент наиболее рациональным путем является разработка приближенных решений инженерными методами. Определение искомых параметров может облегчить учет температурного фактора. Но это возможно лишь при условии разработки соответствующей физико-математической модели. Цель работы – уточнение механизма протекания воздуха в торцовых зазорах ротационных машин. Задачи исследований – выявление закономерностей распределения скорости протечек воздуха на основе учета температурного фактора.

Действительная производительность вакуумного насоса  $V_0$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) меньше теоретической  $V_h$  на величину потерь, которые можно учитывать коэффициентом откачки  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{V_0}{V_h}, \quad (1)$$

где  $V_0$  – объемная производительность насоса при

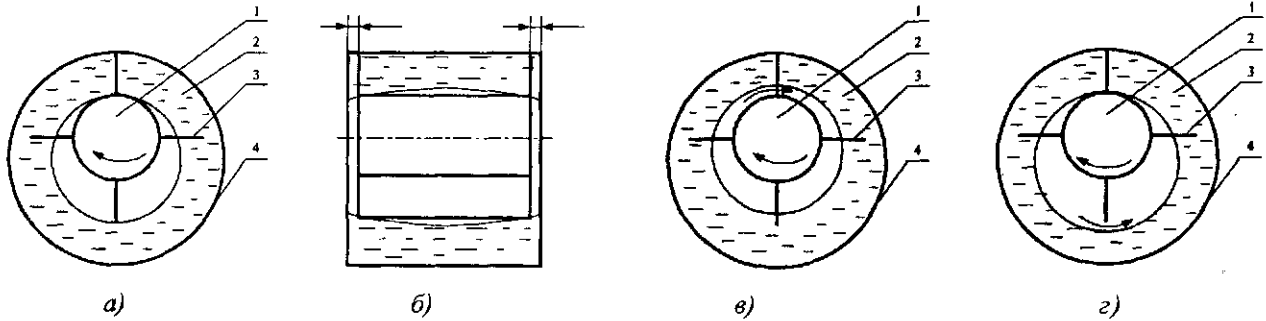


Рис. 1. Схема щелей водокольцевого вакуумного насоса:

а) – схема насоса (1 – ротор, 2 – жидкостное кольцо, 3 – лопатки, 4 – корпус); б) – торцовые и гидродинамические зазоры; в) – верхний щелевой зазор; г) – нижний щелевой зазор

давлении  $p_0$  и температуре  $T_0$  во всасывающем патрубке.

Это положение подтверждают массовый и тепловой балансы на участке всасывания. Масса воздуха в описанном объеме  $G_h'$  складывается из действительной производительности  $G_0$ , протечек через торцовый зазор ( $G_z$ ) и количества воздуха, переносимого в защемленном объеме ( $G_m$ ). Составляя баланс тепла в полости всасывания, получают

$$c_p(G_0 + G_z + G_m)(T_0 - T_0) = c_p(G_z + G_m)(T_n - T_0) + Q_i$$

где  $T_0'$  – температура воздуха в ячейке к концу всасывания;

$T_0$  – температура воздуха во всасывающем патрубке;

$T_n$  – температура воздуха, перетекающего во всасывающую полость через щели;

$Q_d$  – количество тепла, переданного воздуху в полости всасывания ротором и пластинами.

Из уравнения состояния имеем:

$$G_h' = G_h \frac{T_0}{T_0'} \quad (3)$$

С учетом вышеприведенных уравнений формула для коэффициента откачки вакуумного насоса принимает следующий вид:

$$\lambda = 1 - \frac{(G_z + G_m)T_0'}{G_h T_0} - \frac{Q_d}{c_p T_0 G_h} \quad (4)$$

Внутренние перетекания воздуха в водокольцевом насосе вызывают торцовые щели и бочкообразная форма внутренней поверхности жидкостного кольца (рис. 1,б), а также отход жидкостного кольца от втулки ротора (рис.1,в)

и выход лопаток из жидкостного кольца (рис. 1,г).

Внутренние перетекания воздуха в пластинчатых насосах происходят через радиальные и торцовые щели (рис.2,а; 2,б), изолированный объем (рис. 2,в) и микрощелевые зазоры (рис.2,г). Основное влияние на коэффициент откачки оказывают протечки воздуха через торцовые зазоры. Торцовый зазор – щель между торцами лопаток и ротора вакуумного насоса, с одной стороны, и торцовой крышкой – с другой. Источники перетечек воздуха – ячейки вакуумного насоса.

Рассмотрим одну ячейку вакуумного насоса. Процесс перетекания воздуха из этой ячейки представляет собой сложный процесс. Так, например, на стороне нагнетания основная часть перетечек происходит в зазорах лопатки и торцовой крышки. Входное отверстие зазора

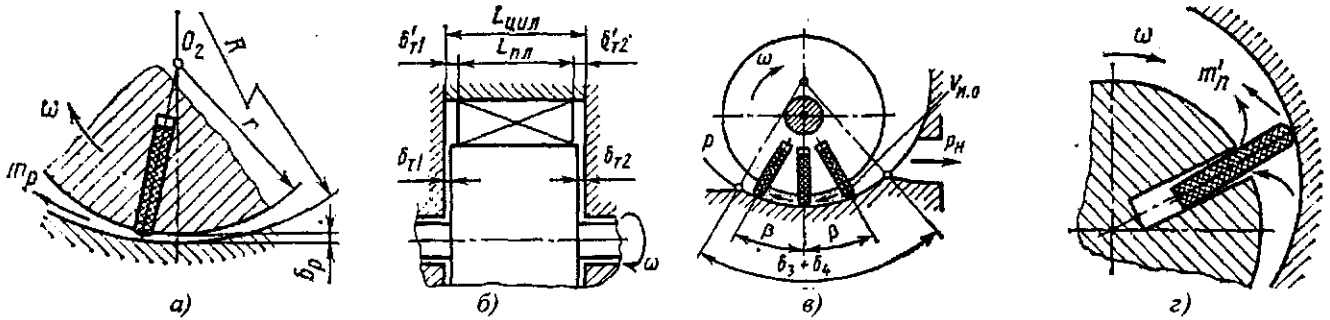


Рис. 2. Схемы щелей пластинчатого вакуумного насоса:  
а) – радиальная; б) – торцовая; в) – в изолированном объеме; г) – микрощелевая

имеет площадь  $S_1$ , выходное –  $S_2$ . На входе скорость воздуха равна  $\mathcal{G}_1$ , температура –  $T_1$ , давление –  $p_1$ . На выходе температура воздуха равна  $T_2$ , давление –  $p_2$ . Скорость воздуха в выходном сечении определяется вышеприведенными макроскопическими параметрами и временем прохождения струй воздуха из одной ячейки в смежную. За время  $\Delta t$  в щель входит объем воздуха

$V_1 = S_1 \mathcal{G}_1 \Delta t$ , а выходит объем  $V_2 = S_2 \mathcal{G}_2 \Delta t$ . Так как это равные массы, то из обобщенного газового закона

$$p_1 V_1 / T_1 = p_2 V_2 / T_2 \text{ находим } \mathcal{G}_2 = \frac{p_1 T_2 S_1}{p_2 T_1 S_2} \mathcal{G}_1.$$

Площадь входного торцового зазора определяется углом сжатия воздуха. Этот угол в среднем составляет  $\frac{\pi}{3}$ .

Площадь выходного торцового зазора измеряется углом, определяющим процесс всасывания воздуха. Этот угол в среднем составляет  $\pi$ . Учитывая угловое соотношение секторов всасывания и нагнетания воздуха, можно написать

$$\mathcal{G}_2 = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} \cdot \frac{\pi}{3\pi} \mathcal{G}_1 = \frac{p_1 T_2 \mathcal{G}_1}{3 p_2 T_1}. \quad (5)$$

Давление сжимаемого воздуха в ячейке определяется формулой

$$p_1 = p_0 \left( \frac{2}{1 + \cos \varphi - \frac{e}{R} \sin^2 \varphi} \right)^k, \quad (6)$$

где  $p_0$  – давление всасывания;

$k$  – показатель политропы.

Давление в смежной ячейке для ротора с четырьмя лопатками

$$p_2 = p_0 \left( \frac{2}{1 + \cos(\varphi - \frac{\pi}{2}) - \frac{e}{R} \sin^2(\varphi - \frac{\pi}{2})} \right)^k \quad (7)$$

Температура сжимаемого воздуха (исходя из адиабатического процесса сжатия) выразится соответственно в двух смежных ячейках:

$$T_1 = T_{ac} \left( \frac{p_\varphi}{p_{ac}} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_{ac} \left( \frac{2}{1 + \cos \varphi - \frac{e}{R} \sin^2 \varphi} \right)^{k-1} \quad (8)$$

$$T_2 = T_{ac} \left( \frac{2}{1 + \cos(\varphi - \frac{\pi}{2}) - \frac{e}{R} \sin^2(\varphi - \frac{\pi}{2})} \right)^{k-1} \quad (9)$$

Тогда значение скорости воздушной струи, протекающей в смежную ячейку, можно записать в виде

$$\mathcal{G}_2 = \frac{\left( 1 + \cos(\varphi - \frac{\pi}{2}) - \frac{e}{R} \sin^2(\varphi - \frac{\pi}{2}) \right)}{1 + \cos \varphi - \frac{e}{R} \sin^2 \varphi} \cdot \frac{\mathcal{G}_1}{3} \quad (10)$$

Сложность представляет определение скорости истечения воздуха  $\mathcal{G}_1$  из ячейки с большими температурой  $T_1$  и давлением  $p_1$  в смежную ячейку. Высота зазора значительно превышает длину свободного пробега молекул воздуха в ячейке, поэтому воздушная струя является макроскопическим потоком. Малая толщина пластин и промежуток времени истечения позволяют считать давление и температуру воздуха в ячейке постоянными. Пренебрегая тангенциальными силами вязкости между соседними элементами потока воздуха, воспользуемся законом сохранения энергии. Воздух, находящийся в некоторый момент времени между сечениями 1 и 2

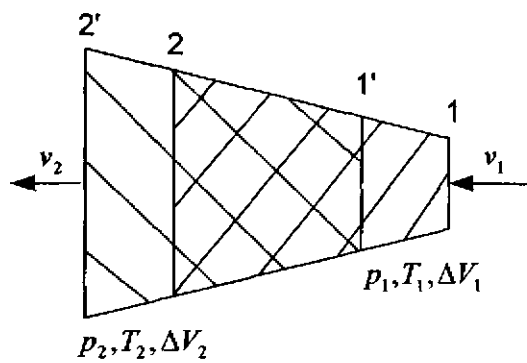


Рис. 3. Постоянство энергии струи воздуха за время  $\Delta t$

трубки тока (рис. 3) и перешедший за малый промежуток времени в новое положение между сечениями 1' и 2', характеризуется изменением внутренней энергии – энергия  $U$  и кинетической – энергия макроскопического направленного движения  $E_k$ :

$$\Delta U + \Delta E = \Delta Q + \Delta A; \quad (11)$$

где  $\Delta Q$  – количество теплоты, сообщенное воздуху;

$\Delta A$  – работа, совершенная действующими на воздух внешними силами за время  $\Delta t$ .

Считая продолжительность истечения через зазор выделенной части воздуха короткой и пренебрегая теплообменом, можно считать процесс истечения воздуха адиабатическим, т.е. положить  $\Delta Q = 0$ . Тогда

$$\Delta U + \Delta E - \Delta A = 0. \quad (12)$$

Внутренняя энергия выделенной части воздуха  $\Delta U$  определяется изменением температуры

$$\Delta U = \nu C_V (T_1 - T_2), \quad (13)$$

где  $C_V$  – молярная теплоемкость при постоянном объеме;

$\nu$  – количество воздуха.

Изменение кинетической энергии

$$\Delta E_k = \nu \mu (g_2^2 - g_1^2) / 2, \quad (14)$$

где  $C_V$  – молярная масса воздуха;

$g_1$  и  $g_2$  – скорости струи на входе и выходе из зазора соответственно.

Действующие на выделенную часть воздуха силы давления со стороны соседних участков в сечении 1 направлены вдоль перемещения и противоположно перемещению в сечении 2. Макроскопические параметры – температура  $T$  и давление  $P$  – равновесной термодинамической системы одинаковы во всех точках. Значения этих параметров воздушного потока меняются. Локальное термодинамическое равновесие лишь от-

дельных частей потока, а также медленное изменение скорости макроскопического движения воздуха в пространстве и во времени позволяют считать давление и температуру воздуха меняющимися вдоль трубки тока. Так как значения этих параметров связаны между собой уравнением состояния, то работу  $\Delta A$  при перемещении количества воздуха за время можно выразить через температуру воздуха в сечениях 1 и 2:

$\Delta V_1$  – объем части трубки тока между сечениями 1 и 1';

$\Delta V_2$  – объем части трубки тока между сечениями 2 и 2'.

Уравнение закона сохранения энергии можно записать в виде

$$(C_V + R)(T_2 - T_1) + \nu \mu (g_2^2 - g_1^2) / 2 = 0. \quad (15)$$

Учитывая, что  $C_V + R = C_p$ ,  $\gamma = C_p / C_V$ , мож-

но написать  $C_p = \frac{C_p}{C_V} C_V = \gamma (C_p - R)$ , (16)

где  $C_p$  – молярная теплоемкость при постоянном давлении.

Откуда  $C_p = R\gamma / (\gamma - 1)$ . В результате

$$g_1 = \sqrt{\frac{2}{\mu \gamma - 1} R (T_1 - T_2)}. \quad (17)$$

Тогда выражение скорости потока на выходе в смежную ячейку при числе пластин, равном четырем, примет окончательный вид:

$$g_2 = \frac{\left(1 + \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{e}{R} \sin^2\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right)}{3 \left(1 + \cos \varphi - \frac{e}{R} \sin^2 \varphi\right)}$$

$$\sqrt{\frac{2}{\eta (\gamma - 1)} R \dot{Q}_m \left[ \left( \frac{2}{1 + \cos \varphi - \frac{e}{R} \sin^2 \varphi} \right)^{\gamma - 1} - \left( \frac{2}{1 + \cos \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right) - \frac{e}{R} \sin^2 \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right)} \right)^{\gamma - 1} \right]}$$

При исходных данных ( $T_{oc} = 300$  К,  $\eta = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $\gamma \approx 1,4$ ,  $0 \leq \varphi \leq 180^\circ$ ,  $k = 1,4$ ,  $R = 8,31$ ) рассчитаны скорости перетечек воздуха между смежными ячейками. Скорость воздуха на

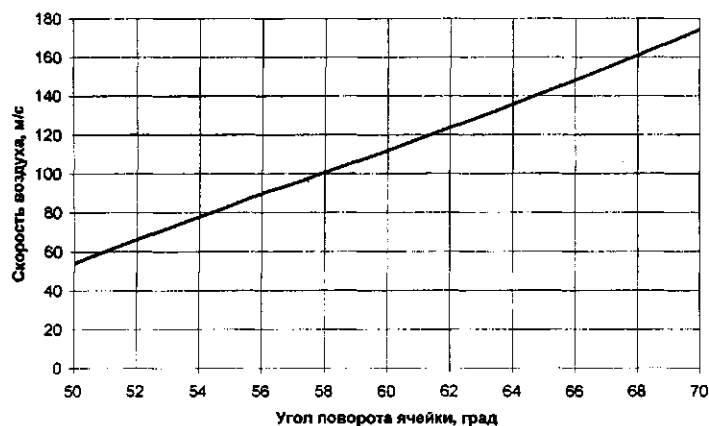


Рис. 4. Зависимость скорости протечек воздуха от угла поворота ячейки

угле поворота ячейки от 50 до 70° переменная и достигает 180 м/с (рис. 4).

Воздух и смазка движутся мелкими струйками в торцовых щелях между боковыми крышками и торцами ротора и пластин. Скорость воздушного потока по направлению вращения ротора наибольшая в зоне максимального перепада давления. Кинетическая энергия направленного движения воздушной струи из ячейки вакуумного насоса обуславливается внутренней энергией хаотического теплового движения молекул воздуха в ячейке. Так как внутренняя энергия воздуха зависит только от температуры, то скорость истечения определяется температурой. Величина скорости струи

обратного потока воздуха определяется перепадом температур воздуха смежных ячеек. Уменьшение щелевых протечек воздуха насосом является эффективным средством повышения их экономичности. Учет температурного фактора упрощает расчет скоростей перетечек воздуха.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Колончук М.В., Передня В.И. Термодинамика воздушных потоков ротационного насоса. — Методы исследования и результаты разработок для ресурсосберегающих технологий сельского хозяйства: в 2 т. /Под общ. ред. В.Н. Дашкова. — Мн.: 2005. Сб. ст. Международной науч.- практич. конф. молодых ученых /РУНИП “ИМСХ НАН Беларуси”. Т.2.— 202 с. (Научное издание).
2. Механические вакуумные насосы /Е.С.Фролов, И.В.Автономова, В.И.Васильев и др. — М.: Машиностроение, 1989. — С. 56.
3. Бутиков Е.И., Быков А.А., Кондратьев А.С. Физика в примерах и задачах: Учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука. Гл. ред: физ-мат. лит., 1989. — С. 201-204.
4. Головинцов А.Г., Румянцев В.А., Ардашев В.И. и др. Ротационные компрессоры. — М.: Машиностроение, 1964. — 315 с.

УДК 620.9

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И ПРИГОРОДНОЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

А.В. Новиков, канд. техн. наук, доцент, Л.Г. Шейко, канд. с.-х. наук, К.Ф. Саевич, докт. биол. наук, профессор (УО БГАТУ)

Сельское хозяйство является такой отраслью экономики, в которой производство наиболее тесно связано с природой. Современное техническое развитие привело к неблагоприятным изменениям в окружающей среде. Это загрязнение воздуха, почвы, пресных вод, накопление в атмосфере газов, дающих парниковый эффект, кислотные дожди, нарушение озонового слоя.. Мощным фактором уменьшения площадей пахотных земель является строительство новых зданий, автомобильных и железных дорог, нефте- и газопроводов. С развитием городов идёт наступление на плодородные земли, происходит загрязнение почв и водных ресурсов токсичными для растений веществами за счёт трансграничного их переноса и локального загрязнения у дорог и промышленных объектов. Увеличивается протяжённость инженерных коммуникаций: трубопроводов водоснабжения, канализации,

тепло- и газоснабжения, силовых и слаботочных кабелей, линий связи и других. Их нахождение в подземном пространстве оказывает мощное техногенное воздействие на геологическую среду, изменяет её свойства. Происходит механическое разрушение и химическое загрязнение почв.

Существуют определённые закономерности взаимодействия между геологической средой и инженерными коммуникациями, которые определяют её коррозионную активность. Например, силовые кабели оказывают на грунт электрохимическое воздействие, утечки газопроводов приводят к активизации в нём химических процессов, тепловые сети, в которых теплопотери порой составляют до 20%, вызывают тепловое воздействие, и вместе с другими водонесущими коммуникациями изменяют геологическую обстановку, вплоть до повышения уровня грунтовых вод. Возможны также