

Исследование процесса гидродинамического движения газожидкостной смеси в замкнутом контуре «молочная железа – доильная машина – счётчик молока – молокопровод» системы «Ч–М–Ж–С»

В.А. Шахов, д.т.н., профессор, **В.А. Урбан**, к.т.н., **Е.В. Вагенлейтнер**, аспирант, **А.Ю. Бабков**, аспирант, **Е.А. Шахова**, аспирантка, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

Важным вопросом является обоснование влияния движущейся газожидкостной смеси на изменение вакуума в подсосковой камере доильного стакана. По мнению профессора Л.П. Карташова, падение вакуума в вакуумной системе доильной установки и под соском допускается 2,66–6,65 кПа [1].

Транспортирующая способность доильной машины не всегда соответствует интенсивности молокоотдачи. Установлено, что при максимальной молокоотдаче молоко переполняет молочную камеру коллектора и молочного шланга [1–7]. Вследствие этого снижается величина вакуумметрического давления в подсосковой камере и его стабильность. Происходит возвратно-поступательное движение молока в молочном шланге, создающее условие «мокрого» доения.

Рассмотрим движение одиночной частицы смеси с устойчивой оболочкой, движущейся в молочной массе. Скорость её движения можно определить по формуле:

$$V = \frac{Q_M + Q_G}{S}, \quad (1)$$

где Q_M – подача молока, м³/ч;

Q_G – подача газа, м³/ч;

S – сечение молокопровода, м².

При движении частицы возникает сила сопротивления:

$$\vec{F}_n = \frac{K_n \cdot \rho_M \cdot S_M}{2}, \quad (2)$$

где $\vec{F}_n$ – сила прямого сопротивления, Н;
 K_n – коэффициент прямого сопротивления, Н/см²;

ρ_M – плотность молока;

S_M – площадь миделевого сечения частицы смеси, м².

Примем, что при движении разрушения оболочки частицы не возникает, т.е. движение частиц существенно не отличается от движения твёрдых частиц. Тогда коэффициент прямого сопротивления равен [1–5, 8]:

$$K_n = f(\text{Re}). \quad (3)$$

На частицу действует несколько сил, в том числе сила инерции самой частицы и сила инерции присоединённой массы молока:

$$\vec{F}_{u.n.} = \rho_v \cdot V_v \cdot \vec{a}_{v.n.}, \quad (4)$$

$$\vec{F}_{u.m.} = K \cdot \rho_M \cdot V_v \cdot \vec{a}_m, \quad (5)$$

где $\vec{F}_{u.n.}$ – сила инерции частиц, Н;

ρ_v – плотность воздуха, кг/м³;

V_v – объём воздуха, м³;

$\vec{a}_{v.n.}$ – абсолютное ускорение частицы смеси, м/с²;

$\vec{F}_{u.m.}$ – сила инерции молочной массы, Н;

K – коэффициент диффузии молока;

$\vec{a}_m$ – абсолютное ускорение молока в рассматриваемой точке, м/с²

При движении частицы изменяется её масса вследствие растворимости или диффузии и возникает реактивная сила Мещерского [8]:

$$\vec{F}_M = K_p \cdot \vec{V}_0 \cdot \frac{dm}{dt}, \quad (6)$$

где K_p – коэффициент реактивности, обусловленный характером изменения массы частицы;
 V_0 – собственная скорость частицы;
 m – масса частицы, кг

По закону Архимеда известно, что газ, введенный в жидкость, обладает подъёмной силой, равной весу вытесненной им жидкости:

$$\vec{F}_A = \rho_m \cdot g \cdot V_v, \quad (7)$$

где g – величина ускорения свободного падения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Также известно, что при движении газожидкостной смеси происходит уменьшение вакуумметрического давления, влияющее на качество доения:

$$\vec{F}_{n.d.} = \Delta P_{\text{вак}} \cdot S_m, \quad (8)$$

где $\vec{F}_{n.d.}$ – сила от уменьшения вакуумметрического давления, Н;

$\Delta P_{\text{вак}}$ – величина изменения вакуумметрического давления, Па.

Суммируя приведённые силы по уравнениям (2–8) с учётом их направления и принципа Даламбера, получим уравнение движения одиночной частицы в потоке молока (рис. 1):

$$\vec{F}_\partial = \frac{K_n \cdot \rho_m \cdot S_m}{2} + \rho_v \cdot V_v \cdot \vec{a}_{в.п.} + K \cdot \rho_m \cdot V_v \cdot \vec{a}_m + K_p \cdot \vec{V}_0 \cdot m + \rho_m \cdot g \cdot V_v + \Delta P_{\text{вак}} \cdot S_m, \quad (9)$$

где $\vec{F}_\partial$ – уравновешивающая сила Даламбера, Н.

В связи с тем что плотность воздуха мала по сравнению с плотностью молока, уравнение (9) примет вид:

$$\vec{F}_\partial = \frac{K_n \cdot \rho_m \cdot S_m}{2} + K \cdot \rho_m \cdot V_v \cdot \vec{a}_m + \rho_m \cdot g \cdot V_v + \Delta P_{\text{вак}} \cdot S_m. \quad (10)$$

Движение газожидкостной смеси в замкнутом контуре «молочная железа – доильная машина – счётчик молока – молокопровод» представим в виде сообщающегося сосуда. Вакуумметрическое

давление внутри такого сосуда одинаково (рис. 1). Тогда можно записать уравнение:

$$h_4 \cdot g \cdot \rho_{см} = h_3 \cdot g \cdot \rho_m, \quad (11)$$

где $\rho_{см}$ – плотность газожидкостной смеси, г/см³;
 h_4 – высота от центра выходного патрубка коллектора до точки эффекта разделения смеси воздух – молоко, м;
 h_3 – высота от центра выходного патрубка коллектора до кончика соска вымени животного, м.

Анализ движения потока газожидкостной смеси показывает, что на всём протяжении её состав изменяется. Так, на участке «молочная железа – коллектор» смесь более насыщена молоком. Такое насыщение способствует снижению вакуумметрического давления и эвакуации молока. Это происходит и на интервале подъёма молока от коллектора к молокопроводу до некоторой высоты h , выше которой состав смеси изменяется, становится более насыщенным воздухом. Изменяется режим движения и увеличивается вакуумметрическое давление в сравнении с подсосковой камерой (рис. 2).

При этом возникает сила внутренней неоднородности смеси:

$$F_{н.с.} = \rho_{см} \cdot g \cdot h_4 \cdot S_{м.ш.} \cdot K_{сч}, \quad (12)$$

где $S_{м.ш.}$ – площадь сечения шланга, соединяющего коллектор с молокопроводом, м²;

$K_{сч}$ – коэффициент сопротивления движению газожидкостной смеси от счётчика молока (~1,07), выведен экспериментально.

При движении газожидкостной смеси возникает сила трения, противодействующая её перемещению при доении. С учётом уравнения (9) запишем:

$$F_\partial = \frac{K_n \cdot \rho_m \cdot S_m}{2} + K \cdot \rho_m \cdot V_v \cdot \vec{a}_m \cdot V_n + \rho_m \cdot g \cdot V_v + \Delta P_{\text{вак}} \cdot S_m - F_{тр} \quad (13)$$

где V_n – скорость образования пузырьков воздуха при движении по шлангу, шт/ч;

$F_{тр}$ – сила трения газожидкостной смеси, Н.

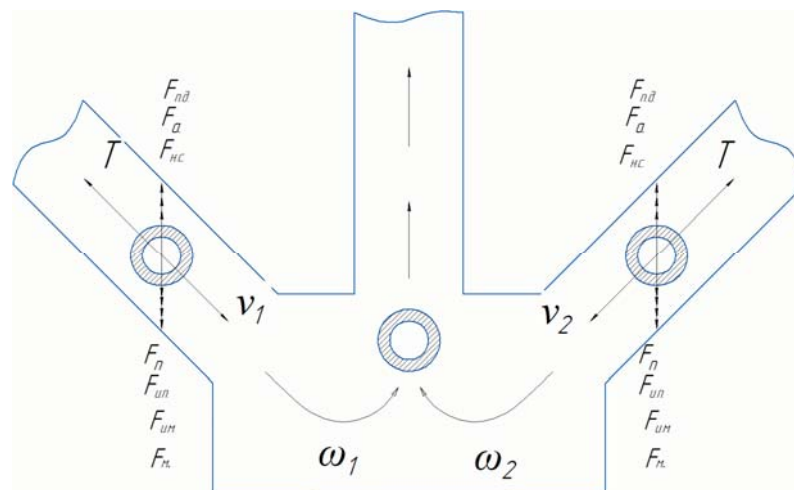


Рис. 1 – Схема сил, действующих на оболочку частицы смеси в газожидкостном потоке

Некоторые авторы указывают, что при несоответствии размеров соска и сосковой резины происходит подсос воздуха [1, 3–6, 8]. Вследствие этого снижается величина вакуумметрического давления в подсосковой камере и молочных шлангах. Значит, высота h_4 будет меньше (рис. 2) и сила внутренней неоднородности не будет постоянной $F_{н.с.} \neq const$. Сила внутренней неоднородности максимальна при интенсивной молокоотдаче и снижается в начале и конце доения практически до нуля.

Тогда с учётом силы $F_{н.с.}$ уравнение (12) примет вид:

$$F = \left(\rho_{см} \cdot g \cdot h_4 \cdot S \cdot K_{сч} + \rho_m \cdot g \cdot V_в + \Delta P_{вак} \cdot S_m - \left(\frac{K_n \cdot \rho_m \cdot S_m}{2} + K \cdot \rho_m \cdot V_в \cdot a_m \right) \right) \cdot K_{сч}. \quad (14)$$

Таким образом, полученное уравнение отражает все силы, действующие на поток газожидкостной смеси при движении от молочной железы до молокопровода.

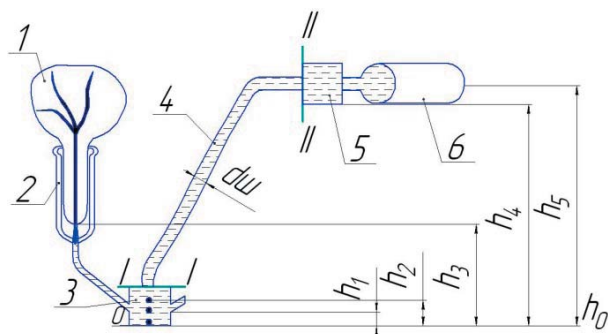


Рис. 2 – Замкнутая система гидравлического контура «молочная железа – доильная машина – счётчик молока – молокопровод»:

1 – молочная железа; 2 – доильный стакан; 3 – коллектор; 4 – молочный шланг; 5 – счётчик молока; 6 – молокопровод; h_0 – нулевая линия; т. A_0 – мнимая точка векторов скоростей движущейся газожидкостной смеси; h_1 – средняя линия; h_2 – верхняя линия; h_3 – высота расположения кончика соска относительно h_0 ; h_4 – высота от h_0 до входа в счётчик молока; h_5 – высота от h_0 до центра молокопровода; $d_{ш}$ – диаметр молочного шланга; I-I – сечение молочной трубки на выходе из коллектора; II-II – сечение молочного шланга на входе в счётчик молока.

Как отмечалось ранее, различное сочетание подач воздуха в подсосковую камеру доильных стаканов при доении приводит к образованию кольцевой, диспергированной или пробковой структур потока [1, 3–6, 8]:

$$K_{с.ф.} = \frac{Q_B}{Q_M}. \quad (15)$$

Тогда, учитывая уравнения (9) и (13) и исключая промежуточные преобразования, запишем:

$$K_{с.ф.} = \frac{F_A}{F_{н.с.} \cdot \frac{S_{М.Т.}}{S_{М.Ш.}}}, \quad (16)$$

где $S_{М.Т.}$ – площадь сечения молочной трубки на выходе из коллектора, m^2 ;

$S_{М.Ш.}$ – площадь сечения молочного шланга на входе в счётчик молока, m^2 .

Работа силы $F_{н.с.}$ затрачивается на транспортировку молока на высоту h_3 . А полученное уравнение (10) представляет собой критерий динамического подобия, отражающий величину отношения сил Архимеда и внутренней неоднородности смеси. Наиболее эффективно система (рис. 2) будет работать при оптимальных значениях h_4 и наибольшем насыщении молоком газожидкостной смеси. Если $h_1 = 0$, то $F_{н.с.}$ отсутствует.

Известно, что при максимальной интенсивности доения в коллекторе происходит падение разрежения в пределах одного такта сосания на 6,7–10,7 и даже на 15 кПа [1, 3–5, 8]. В результате подача воздуха резко снижается, транспортирующая способность машины не обеспечивает подъём смеси на высоту h_5 в оптимальном режиме.

Без доступа воздуха в замкнутый контур столб смеси снижает разрежение до 3,34 кПа на каждые 0,33 м высоты подъёма и при $h = 1,2$ м даёт $\Delta P' = 12,54$ кПа. Определение $\Delta P'$ по другим уравнениям [1, 8] при $\rho_m = 1030$ кг/м³ имеет идентичный результат. При наличии дросселирующего отверстия d в доильном стакане воздух смешивается с молоком, а пропускная способность участка «молочная железа – коллектор – счётчик молока – молокопровод» и стабильность разрежения увеличиваются [1, 2].

Неотъемлемым комплектом при доении в молокопровод является счётчик молока. Для уменьшения погрешности измерений счётчики следует настраивать на определённый состав газожидкостной смеси и располагать на соответствующей отметке h_4 .

Таким образом, значительное влияние на режим движения смеси перед входом в счётчик молока оказывает высота h_3 расположения кончика соска относительно h_0 нижней линии коллектора. Действующие при этом импульсы сил потоков смеси зависят от интенсивности молокоотдачи и влияют на расслоение состава смеси перед счётчиком молока.

Литература

1. Карташов Л.П., Соловьёв С.А., Шахов В.А. Лабораторные стенды для испытания животноводческой техники. М.: Колос, 2009.
2. Венда Н.П. Некоторые вопросы теории дифференцированных уравнений и приложения в механике. М.: Наука, 1991.
3. Шахов В.А. Методика лабораторных исследований работы доильных машин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2011. № 2.
4. Шахов В.А. Методика проектирования высокоскоростных доильных машин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2011. № 1 (19).
5. Шахов В.А. Новое оборудование для испытаний доильных аппаратов // Сельский механизатор. 2006. № 8.
6. Шахов В.А. Методология проектирования доильного оборудования // Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 10.
7. Патент на изобретение. Стенд для испытания доильных аппаратов / С.А. Соловьёв, В.А. Шахов, И.В. Герасименко / № 2298317 от 10.05.2007 г.
8. Кузьмин А.Е. Гидравлическая характеристика доильных установок. Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1997.