

УДК 519.6:637.116.4

В.О. Китиков, Е.В. Тернов

(РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»,

г. Минск, Республика Беларусь)

М.М. Чуйко

(ГНУ «Институт математики НАН

Беларуси,

г. Минск, Республика Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДООИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ РАЗРЕЖЕНИЯ

Технологические требования к режиму работы вакуумной системы

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность машинного доения коров, является величина рабочего вакуума под соском. Молоко в вымени коровы между дойками находится под давлением в пределах 102–103 *кПа* и может достигать 104–105 *кПа* [1]. Вакуумная система современных доильных установок создает разрежение в подсосковом пространстве доильного стакана порядка 45–50 *кПа* [2]. Чем выше перепад этих давлений, тем быстрее молоко отсасывается из вымени. В то же время чем ниже давление под соском коровы, тем сильнее болевое воздействие на вымя и выше вероятность заболевания коров маститом.

В соответствии с требованиями [3] произведение амплитуды изменения вакуума от номинального значения на продолжительность этого изменения не должно превышать 20 *кПа·с*. На практике рекомендуется допустимое значение 6,67 *кПа* и время действия такого вакуума не более 3 секунд. Перепад вакуумметрического давления между вакуумной установкой и вакуумным регулятором, а также между вакуумным регулятором и любой точкой в вакуум-проводе в условиях испытаний не должен превышать 2,5 *кПа*. Просачивание атмосферного воздуха в вакуумную систему не должно превышать 5% номинальной производительности вакуумной установки. Просачивание воздуха через трубопроводы и фитинги молокопровода при рабочем вакууме не должно превышать 20 *л/мин*. Отклонение вакуума от заданных параметров не должно превышать 2,66–3 *кПа* [2, 4]. Поток воздуха, подсасываемого через доильные аппараты, составляет $(0,62 \dots 0,79) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ [1].

Анализ современной методики измерений технологических параметров доильных установок [4] показывает, что положение измерительных контрольных точек отражает требования к обеспечению баланса вакуума в вакуумной системе доильной установки. При этом состав процедур измерений и порядок их выполнения строго формализован, что является существенным условием реализуемости автоматизации стабилизации разрежения.

Обобщенные критерии оценки состояния вакуумной системы

Баланс вакуума в вакуумной системе зависит от количества воздуха, которое откачивает вакуумный насос, и количества воздуха, которое попадает в систему [1]. Его выражают соотношением:

$$Q_t = Q_{BA} + Q_{BX} + Q_P, \quad (1)$$

где Q_t – количество воздуха, которое откачивает вакуумный насос;

$Q_{BA} = q_B \cdot N$ – количество воздуха, которое подсасывают доильные аппараты;

$Q_{BX} = 0,15 \cdot Q_{BA}$ – оценка количества воздуха, просачиваемого в систему через неплотности в соединениях вакуум- и молокопровода;

$Q_P = 1,5 \cdot Q_{BA}$ – оценка количества воздуха, впускаемого в систему вакуумным регулятором;

q_B – подсос воздуха доильным аппаратом, m^3/c ;

N – общее количество доильных аппаратов, подключенных к вакуумной системе.

Таким образом, приближенная оценка баланса вакуума

$$Q_t = 2,65q_B \cdot N. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) справедливы для вакуумной системы без утечек. В действительности же имеет место приток окружающего воздуха в вакуумную систему через доильные стаканы при их надевании или спадании, через неплотности трубопроводных соединений, точки подсоединения переносных доильных аппаратов к линейному вакуум-проводу. Существенное изменение рабочего вакуума может быть обусловлено образованием газовой фазы за счет испарения молока, так как молочная линия сообщается с вакуумной.

В общем случае четкими критериями оценки вакуумной системы являются рабочий уровень вакуума в вакуум-проводе, а также разница между уровнями вакуума в его начале (вакуумный насос) и конце (молокоприемник). Чем она меньше, тем стабильнее работа доильных аппаратов. Оценка параметров вакуумной системы с использованием названных критериев реализована в современном измерительном оборудовании ведущих производителей оборудования доильных залов (DeLaval, Westfalia Surge) и в методике его применения.

Технологические требования к системе автоматического регулирования уровня разрежения

Эффективный режим работы доильной установки требует постоянной поддержки необходимого уровня вакуумметрического давления в системе. Доставка молока от доильных аппаратов в молокоприемник кроме поддержания вакуума требует наличия необходимого потока воздуха. Контроль этих показателей в различных точках и узлах доильной установки является важным моментом для оптимального режима работы доильной установки.

Система регулирования и контроля уровня разрежения должна обеспечивать решение следующих основных задач:

- измерение уровня разрежения и потока воздуха;
- контроль вакуумметрического давления и потока воздуха в системе;
- выдача рекомендаций о возможных источниках неисправностей в работе системы разрежения.

На основании анализа порядка измерений [4] может быть разработан алгоритм автоматического регулирования уровня рабочего вакуума в частях магистрального вакуум-провода. При этом сложность технической реализации системы автоматического регулирования (далее – САР) будет зависеть от числа

опорных и вспомогательных контрольных точек. Для их уточнения требуется теоретическое исследование неустойчивости уровня вакуума, а также накопление набора экспериментальных данных измерений в соответствии с тестом ISO 6690 и его статистическая обработка.

Предположительно наиболее простая САР уровня вакуума может содержать опорные точки в месте подключения кольцевого магистрального вакуумпровода к ресиверу, молокоприемнику, а также посередине длинных сторон магистрального вакуумпровода. Роль регулятора может выполнить программируемый контроллер (либо реле – если пренебречь передачей накопленных параметров в компьютер для анализа). Предварительный поиск датчиков давления с исполнительными механизмами может быть выполнен по каталогам.

Основные положения математической модели, описывающей динамику вакуума в системе

Практически все типы доильных установок представляют собой более или менее сложную гидравлическую сеть, содержащую в своем составе несколько типов отличающихся по своим характеристикам гидравлических трактов. К ним относятся молокопроводы, по которым движется двухфазный поток молоковоздушной смеси, воздухопроводы с однофазным воздушным потоком, молокосорборники, где, благодаря значительному объему внутреннего пространства, скорость потока стремится к нулю и происходит разделение жидкой и газообразной фаз (молока и воздуха), а также доильные стаканы, в которых осуществляется пульсирующий режим течения как молока, так и воздуха, затрачиваемого на привод доильных пульсаций. Вся гидравлическая система типичной доильной установки представляет собой практически герметичную систему с характерным объемом порядка $V=1000$ л. Этот объем не полностью герметичен, так как имеются натекания воздуха внутрь, связанные с затратами его на привод доильных аппаратов, с негерметичностью контактов доильных стаканов и сосков, с натеканием воздуха в стакан с открытым клапаном при надевании стакана на сосок и снятии с соска, с негерметичностью трубопроводных соединений. Кроме воздушного потока имеется также и натекание жидкой фазы (молока), а также образование дополнительного количества газовой фазы за счет испарения молока. Пониженное давление (вакуум) в этом объеме поддерживается за счет работы вакуумного насоса (вакуумной станции), который компенсирует натекающие потоки. Поскольку все эти потоки достаточно неустойчивы, а поддерживающая вакуум в системе насосная станция работает в стационарном режиме, то в большинстве доильных аппаратов применяются регуляторы вакуума, представляющие собой дифференциальный клапан, открывающийся, если разность между наружным и внутренним давлением превышает допустимый предел. Таким образом, на работу регулятора вакуума также требуется расход (натекание) воздуха. Вакуум был бы стабильным в стационарном режиме, когда натекающие потоки воздуха компенсировались бы работой вакуумной установки, то есть выполнялись бы соотношения (1) и (2).

Рассмотрим характерные значения расходов. При затратах воздуха на привод одного пульсатора $q_B=2,7 \cdot 10^{-3}$ м³/с [1] доильная установка с четырьмя до-

ильными аппаратами, согласно (2), должна потреблять $2,65 \cdot 4 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 0,029 \text{ м}^3/\text{с}$. Эта величина примерно соответствует производительности насосной станции СН-60А. При этом максимальная молокоотдача от четырех доильных аппаратов $Q_M = 4 \cdot 0,04 \text{ л/с} = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, из чего следует, что объемный расход молока составляет менее одного процента от расхода воздуха, потребляемого доильной установкой. Это говорит о том, что объемом, занимаемым молоком, при расчете текущего баланса расходов воздуха в доильной установке можно пренебречь. Данный фактор следует учитывать при построении математической модели доильной установки.

Таким образом, стационарное уравнение баланса воздуха (1) может строго выполняться лишь в исключительных случаях. Как правило, все потоки воздуха нестационарны, и для анализа процессов необходимо применять нестационарные уравнения. Это обусловлено в первую очередь тем, что вакуумный насос не обладает фиксированной производительностью, а имеет близкую к линейной расходно-напорную характеристику [5]. Это значит, что его производительность обратно пропорциональна разности давления между вакуумируемым объемом и атмосферой. Так, линейной расходно-напорную характеристику насосной станции СН-60А [5] можно представить в виде:

$$Q_H(p) = C - B(p_0 - p), \quad (3)$$

где p_0 – атмосферное давление, p – давление в системе, $C=166 \text{ м}^3/\text{час}$,
 $B=20 \text{ м}^3/(\text{час} \cdot \text{МПа})$.

Аналогично расход воздуха через регулятор давления определяется его расходно-напорной характеристикой, которую качественно можно выразить уравнением:

$$Q_X(p) = \begin{cases} 0 & \text{если } p \geq p_{nom}; \\ D(p_{nom} - p) & \text{если } p < p_{nom}, \end{cases} \quad (4)$$

где p_{nom} – номинальное давление, D – наклон характеристики регулятора.

Натекание воздуха через неплотности в системе также есть функция разности давлений. Согласно [6], массовый расход воздуха \dot{m} через неплотность с поперечным сечением \bar{A} определяется соотношением:

$$\dot{m}(p, \bar{A}) = \begin{cases} \left(\frac{2}{1+k}\right) \frac{k+1}{2(k-1)} \sqrt{k \rho_0 p_0 \bar{A}} \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left(\frac{1+k}{2}\right)^{\frac{2}{k-1}} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}} & \text{если } p \geq p_0 \left(\frac{2}{1+k}\right)^{\frac{2}{k-1}}; \\ \left(\frac{2}{1+k}\right) \frac{k+1}{2(k-1)} \sqrt{k \rho_0 p_0 \bar{A}} & \text{если } p < p_0 \left(\frac{2}{1+k}\right), \end{cases} \quad (5)$$

где $k = 1,4$ – показатель адиабаты, ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях.

Тогда балансное уравнение, выражающее динамику вакуума в системе, можно записать как

$$\frac{V}{R_g T} \frac{dp(t)}{dt} = \rho_0 q_B(t) N(t) + \dot{m}(p(t), \bar{A}(t)) + \rho_0 Q_X(p(t)) - \rho_0 Q_H(p(t)), \quad (6)$$

где R_g – газовая постоянная для воздуха, T – температура; в правой части стоят функции давления, определенные в (3), (4), (5), а также задаваемые функции времени, описывающие динамику изменения суммарного поперечного сечения неплотностей $\bar{A}(t)$, количество одновременно включенных доильных аппаратов $N(t)$, динамику потребления воздуха отдельным доильным аппаратом $q_B(t)$, включающую скачки расхода воздуха при надевании и снятии аппарата.

Решая (6) совместно с (3)–(5) при заданных функциях $\bar{A}(t)$, $N(t)$, $q_B(t)$, можно рассчитать динамику изменения вакуума в системе, определяемую параметрами характеристик насоса и регулятора давления.

Описанная модель является лишь первым приближением для исследуемой задачи. Уточненная модель будет учитывать тот факт, что все балансообразующие потоки приложены в разных точках довольно сложной гидравлической сети, какой является доильная установка, поэтому в ней осуществляются перетоки из одной точки в другую. При этом возникают потери давления на вязкое трение, так что давления в разных точках установки разные и, следовательно, составляющие баланса будут определяться разными давлениями, а не одним, как в (6). Необходимо будет учитывать наличие молока в молокопроводе, так как потери давления в двухфазном потоке значительно отличаются от потерь в однофазном, содержащем только газовую фазу.

Заключение

1. Стабильность разрежения в современных доильных установках должна обеспечиваться на основе автоматического саморегулирования в системе производства и распределения технологического вакуума.

2. Математическое моделирование процесса изменения разрежения во времени может быть выполнено как имитационными, так и аналитическими методами. Создаваемые с данной целью математические и компьютерные модели позволят уточнить состав технических средств и архитектуру САР рабочего вакуума доильной установки.

05.07.10.

Литература

1. Фененко, А.І. Механізація доїння корів. Теорія і практика: монографія / А.І. Фененко. – К.: ННЦ «ІАЕ», 2008. – 198 с.
2. Техническое обеспечение производства молока: практическое пособие / О.А. Борисенко [и др.]. – Гомель: ЧУП «ЦНТУ «Развитие», 2006. – 188 с.
3. Установки доильные. Конструкция и технические характеристики: ГОСТ 28545–90 (ИСО5707–83). – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 18 с.
4. Тест ISO: системное руководство. – 9699001 / Перевод 2М_0100_311_en_752 (9905). – DeLaval, 2004. – 50 с.
5. Станция насосная СН-60А. Паспорт / КУП «Гомельский мотороремонтный завод». – Гомель, 2000. – 25 с.
6. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1973.