



УДК 697.9:631.22

**М. В. БОДРОВ**, д-р техн. наук, зав. кафедрой отопления и вентиляции;  
**А. Е. РУИН**, асс. кафедры отопления и вентиляции; **А. Ф. ЮЛАНОВА**,  
асс. кафедры отопления и вентиляции; **А. В. БЕШЛЯГА**, магистрант  
кафедры отопления и вентиляции

## ПРИМЕНЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-85;  
эл. почта: tes84@inbox.ru

*Ключевые слова:* горизонтальная система вентиляции, тепловые потери, ветровое давление, энергосбережение.

---

*Приведено обоснование применения энергоэффективных систем горизонтальной вентиляции в животноводческих зданиях в холодный период года. Авторами разработаны теплофизические и аэродинамические основы устройства горизонтальной системы естественной вентиляции коровников, что позволяет снизить энергоемкость и повысить эксплуатационную надежность животноводческих зданий и сооружений.*

---

В настоящее время в Российской Федерации одной из актуальных проблем является обеспечение продовольственной безопасности при общем снижении энергозатрат и себестоимости продукции. В животноводстве повышение энергоэффективности достигается двумя основными способами: полное использование биологической теплоты, выделяемой содержащимся крупным рогатым скотом, и применение естественных источников энергии системами обеспечения параметров микроклимата, в частности, использование естественных систем вентиляции.

Результаты изучения формирования воздушно-теплого режима коровников представлены авторами в работах [1, 2, 3]. За основу взято определение из теплового баланса каждого конкретного сооружения коровника условной температуры  $t_n^1$ , начиная с которой требуется подогрев наружного воздуха (биологическая теплота от животных не покрывает трансмиссионных потерь теплоты и теплоты, необходимой для нагрева минимального количества наружного воздуха для жизнедеятельности животных):

$$t_n^1 = t_b - \frac{Q_b}{F/R_0^{тр} + c_b \cdot G_{н.мин}}, \quad (1)$$

где  $t_b$  – расчетная температура внутреннего воздуха в животноводческом здании, °С;  $Q_b$  – общее количество биологической теплоты, выделяемое содержащимися животными, Вт;  $F = F_{ст} + F_{покp}$  – площадь наружных стен и покрытия, м<sup>2</sup> [1, 3];  $R_0^{тр}$  – сопротивление теплопередаче наружных ограждений, определяемое по методике [1], м<sup>2</sup>·°С/Вт;  $c_b$  – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С);  $G_{н.мин}$  – минимальное необходимое количество воздуха для ассимиляции влагоизбытков в помещениях коровников, кг/ч [3].

Проведенные авторами исследования позволили определить целесообразность использования в холодный период года при искусственном подогреве воздуха ( $t_n^1 > t_n$ ) подачу минимального количества воздуха за счет естественных источников, в частности за счет горизонтальной системы вентиляции при использовании сил ветрового давления.

Горизонтальная вентиляция животноводческих помещений за счет ветрового давления осуществляется двумя способами: через специальные щелевидные регулируемые по воздухопроницаемости проемы в продольных стенах помещений; за счет инфильтрации наружного воздуха через наружные стены. В последнем случае они становятся разновидностью систем вытесняющей приточно-вытяжной вентиляции.

*Горизонтальная вентиляция через проемы в наружных стенах.* Схема такой вентиляции приведена на рис. 1. Она состоит из щелевидных проемов, расположенных под окнами. Промемы заполняются каким-либо местным пористым материалом (соломой, сеном и т. п.).

Основы аэродинамического расчета таких систем изложены в [4]. При расчете систем центры вентиляционных проемов, расположенных на одном уровне, принимаются за плоскости начальных отсчетов. Полное наружное давление на наветренной стороне здания равно  $p_n = c_n \cdot p_d$ ; на заветренной стороне –  $p_3 = c_3 \cdot p_d$ ; внутренне избыточное давление на этом уровне составляет  $p_x$ ; где  $p_d = v_n^2 \cdot \rho_n / 2$  – динамическое давление ветра. Аэродинамические коэффициенты для типовых животноводческих зданий для наветренной стороны равны  $c_n = 0,6-0,8$ , для заветренной стороны –  $c_3 = -0,4 \dots -0,2$  [5].

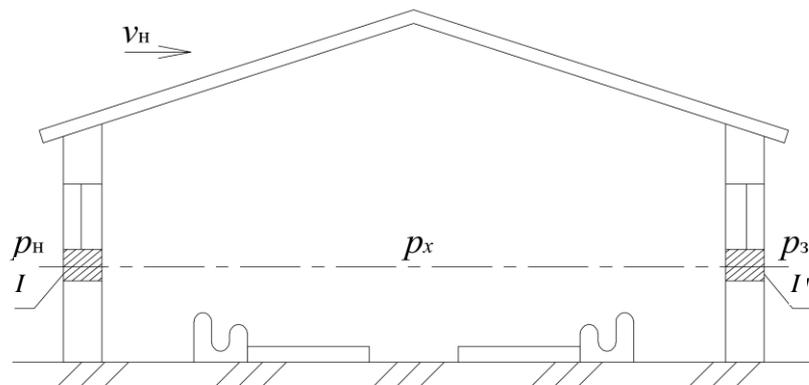


Рис. 1. Схема системы горизонтальной вентиляции: I – щелевидные проемы

Из уравнения баланса воздуха после преобразований получим:  $\Delta p_n \cdot \rho_n = \Delta p_3 \cdot \rho_b$ , где значения  $\Delta p_n$  и  $\Delta p_3$  определяются как  $\Delta p_n = p_n - p_x$ ;  $\Delta p_3 = p_x - p_3$ . Таким образом, имеем следующее уравнение баланса давлений:  $\rho_n (c_n p_d - p_x) = \rho_b (p_x - c_3 p_d)$ , из которого определяем внутреннее избыточное давление на уровне центров вентиляционных проемов:

$$p_x = \frac{(\rho_n \cdot c_n + \rho_b \cdot c_3) \cdot p_d}{\rho_n + \rho_b}. \quad (2)$$



Зная  $p_x$ , находим величины  $\Delta p_H$  и  $\Delta p_3$ :

$$\Delta p_H = (c_H - c_3) \cdot p_d \cdot \rho_B / (\rho_H + \rho_B); \quad \Delta p_3 = (c_H - c_3) \cdot p_d \cdot \rho_H / (\rho_H + \rho_B). \quad (3)$$

Далее по общеизвестной зависимости определяется площадь проемов:

$$F = \frac{G}{3600 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho \cdot g}}. \quad (4)$$

Подставив в (4) значения  $\Delta p_H$  или  $\Delta p_3$  из (3), найдем площадь проемов, состоящих из щелей с наветренной или заветренной сторон:

$$F_H = F_3 = \frac{G}{3600 \cdot \mu \cdot \rho_H \cdot v_B (c_H - c_3) \cdot \sqrt{\frac{\rho_B}{\rho_B + \rho_H}}}. \quad (5)$$

Рассмотрим составляющие (5) применительно к животноводческим зданиям. Горизонтальная вентиляция применяется только в холодный период года при  $t_H$  ниже условной  $t_H^1$ , поэтому расход воздуха  $G$  не должен быть более  $G_{H.min}$ , необходимого для удаления влаги. В периоды  $t_H < t_H^1$ , особенно при аномально нерасчетном понижении температуры наружного воздуха,  $G_{H.min} \rightarrow 0$ .

Количество и площадь каждой из приточных щелей с наветренной стороны и вытяжных щелей с заветренной стороны здания находятся исходя из общей их площади (5) в зависимости от объемно-планировочных решений животноводческих зданий, их ориентации по сторонам света, окружающего ландшафта и т. д. При проектировании систем горизонтальной вентиляции пользуются графическими зависимостями, связывающими коэффициент расхода воздуха  $\mu$  со степенью плотности набивки материала. На рис. 2 приведены значения  $\mu$  при заполнении вентиляционных щелей соломой различной плотностью [2]. Пользуясь этим графиком, по коэффициенту расхода  $\mu$  и требуемой по расходу воздуха скорости в проеме определяется степень его заполнения.

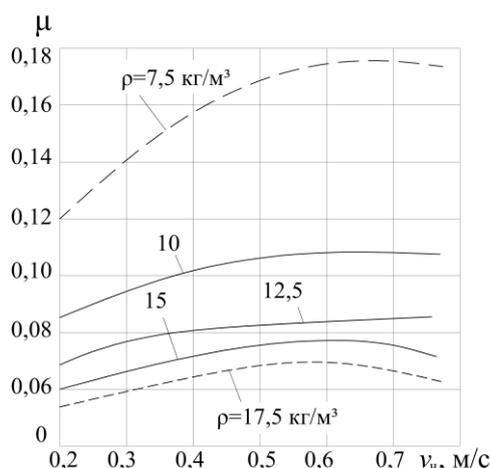


Рис. 2. Значения коэффициента расхода воздуха  $\mu$  в проеме, заполненном соломой

Количественное определение полного давления с наветренной  $p_H$  и заветренной  $p_3$  сторон здания по аэродинамическим коэффициентам  $c_H$  и  $c_3$

необходимо проводить по средней скорости и повторяемости направления ветра за январь месяц, приводимых в нормативной литературе [6]. За расчетную принимается наибольшая алгебраическая разность аэродинамических коэффициентов ( $c_n - c_3$ ).

Отметим, что в современных строительных нормах скорость ветра дается на высоте 10 м от уровня земли. Стены животноводческих зданий подвергаются меньшим ветровым воздействиям. Например, если нормативная скорость ветра для г. Нижнего Новгорода на высоте 10 м лежит в пределах  $v_n = 5,0$  м/с, то на высоте 3,0 м, характерной животноводческим зданиям, она составляет 3,8 м/с, т. е. на 25 % ниже.

*Горизонтальная вентиляция за счет инфильтрации наружного воздуха.* Этот вид горизонтальной естественной вентиляции основан на физическом эффекте поровой инфильтрации через воздухопроницаемые наружные ограждения. Теплофизический смысл положительного эффекта поровой инфильтрации воздуха (тепловой, осушающий, вентиляционный и др.) заключается в сокращении общих трансмиссионных теплопотерь типовых коровников в среднем на 23,1 %, однако, наблюдается конденсация влаги на внутренних поверхностях ограждений при низких температурах внутреннего воздуха [7]. В то же время процесс поровой инфильтрации внутреннего воздуха сопровождается процессами увеличения трансмиссионных потерь теплоты и увлажнением наружных ограждений.

Данное противоречие вызывает необходимость разработки вариантов включения наружных стен в режим устойчивой инфильтрации за счет относительно предсказуемого гравитационного давления  $\Delta p_t$  и неустойчивого, случайного по величине, ветрового давления  $\Delta p_v$ . Анализ проведем при расчетной скорости ветра  $v_n$  (рис. 3).

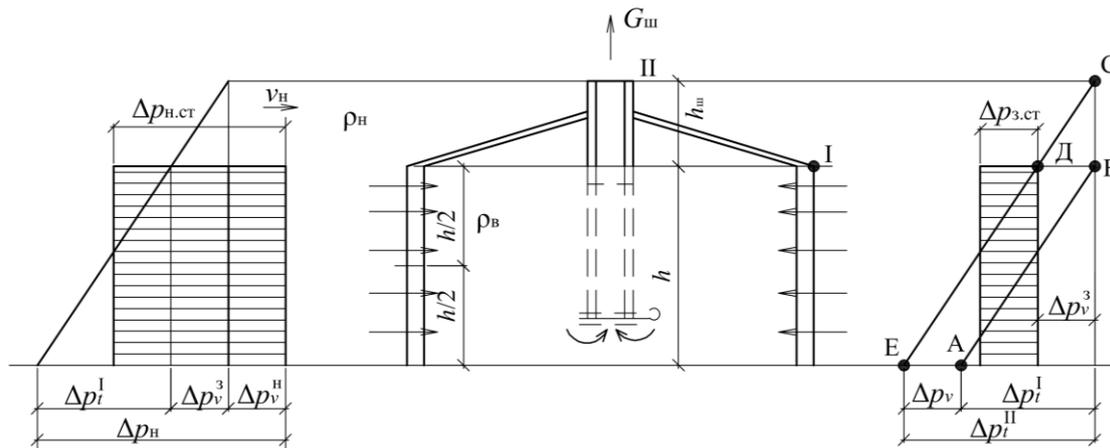


Рис. 3. Расчетные эпюры давлений при устойчивой инфильтрации воздуха

Наименьший перепад давлений для инфильтрации воздуха возникает в верхней плоскости помещения  $\Delta p_t^1 = h \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g$  при наружном ветровом давлении  $\Delta p_v^3 = c_3 \cdot v_n^2 \cdot \rho_n / 2$ . Чтобы заветренная стена находилась в зоне устойчивой инфильтрации, необходимо суммарное избыточное давление в



плоскости I выше нуля ( $\Delta p_t^I + \Delta p_v^3$ )  $\geq 0$ . На графике точка B должна совпадать с точкой D. Такое перемещение за счет естественных источников возможно за счет увеличения гравитационного давления при установке вытяжной шахты высотой  $h_{ш}$ :

$$\Delta p_t^II = (h + h_{ш}) \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g. \quad (6)$$

Гравитационное давление, развиваемое шахтой, равно разрежению на наветренной стене здания  $\Delta p_v^3 = h_{ш} \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g$ . С наветренной стороны общее избыточное давление, вызывающее поровую инфильтрацию равно (плоскость II):

$$\Delta p_n = \Delta p_t^I + \Delta p_v^3 + \Delta p_v^H. \quad (7)$$

Воздушный баланс животноводческого помещения в холодный период года при горизонтальной поровой вентиляции (приток через наружные стены с наветренной стороны  $G_{пр}^H$  площадью  $F_n$  и наветренной стороны  $G_{пр}^3$ ,  $F_3$ , вытяжка через шахту  $G_{ш}$ ) имеет вид:

$$G_{пр}^H + G_{пр}^3 + G_{доп} = G_{ш}, \quad (8)$$

где  $G_{доп}$  – приток воздуха через окна, ворота, двери, кг/ч.

Количество инфильтрующегося через наружную стену площадью  $F_{ст}$  воздуха составляет:

$$G = \Delta p \cdot F_{ст} / R_n, \quad (9)$$

где  $R_n$  – сопротивление воздухопроницанию конструкции, м<sup>2</sup> ч Па/кг.

Средний перепад давлений у наветренной стены равен (рис. 3):

$$\Delta p_{н.ст} = \Delta p_v^H + \Delta p_v^3 + 0,5 \cdot \Delta p_t^I; \quad (10)$$

у наветренной стены

$$\Delta p_{3.ст} = 0,5 \cdot \Delta p_t^I. \quad (11)$$

Количество наружного воздуха, поступающее в животноводческое помещение через наветренную  $G_{пр}^H$  и наветренную  $G_{пр}^3$  стены составляет:

$$G_{пр}^H = \Delta p_{н.ст} \cdot F_{ст} / R_n = (\Delta p_v^H + \Delta p_v^3 + 0,5 \cdot \Delta p_t^I) \cdot F_{ст} / R_n; \quad (12)$$

$$G_{пр}^3 = \Delta p_{3.ст} \cdot F_{ст} / R_n = 0,5 \cdot \Delta p_t^I \cdot F_{ст} / R_n. \quad (13)$$

В развернутом виде эти величины равны:

$$G_{пр}^H = [0,5 \cdot (c_n - c_3) \cdot v_v^2 \cdot \rho_n + 0,5 \cdot h \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g] \cdot F_{ст} / R_n; \quad (14)$$

$$G_{пр}^3 = 0,5 \cdot h \cdot (\rho_n - \rho_v) \cdot g \cdot F_{ст} / R_n. \quad (15)$$

При известном избыточном давлении на отдельные элементы оболочки здания (окна, двери, ворота) инфильтрационный приток воздуха ( $G_{доп}$ ) в помещение определяется по формуле:

$$G_{доп} = \sum G_{и} = \frac{0,21 \cdot \Delta p_{ок}^{0,67} \cdot F_{ок}}{R_{и.ок}} + \frac{\sum p_{дв}^{0,5} \cdot F_{дв}}{R_{и.дв}}. \quad (16)$$

Сопротивление воздухопроницаемости окон  $R_{и.ок}$  определяется по действующим нормам, а для наружных дверей и ворот животноводческих зданий принимается  $R_{и.дв} = 0,3$  (м<sup>2</sup> ч Па)/кг [7]. Рекомендуется использовать панели из



крупнопористого керамзитобетона, сопротивление воздухопроницанию которых  $R_{и} = 0,5-4,5$  ( $\text{м}^2 \text{ ч Па}$ )/кг [7].

Суммарная площадь сечения вытяжных шахт рассматриваемых систем естественной вентиляции в холодный период года равна:

$$F_{ш}^x = G_{н.мин} / 3600 \rho_v v_{ср.ш}, \quad (17)$$

где  $v_{ср.ш} = 4 \cdot \sqrt{0,85 \cdot \Delta p_t / (\sum \zeta + 0,02 \cdot h_{ш} / D)}$  – средняя скорость движения воздуха в шахте, м/с, [4];  $\Delta p_t$  – гравитационное давление, кг/м<sup>2</sup>,  $\Delta p_t = (0,5 \cdot h + h_{ш}) \cdot (\rho_n - \rho_v)$ , за центр поступления наружного воздуха при поровой инфильтрации в холодный период года принята середина высоты наружной стены ( $0,5 \cdot h$ );  $\sum \zeta$  – сумма местных сопротивлений при движении воздуха по шахте;  $D = 2 \cdot a \cdot b / (a + b)$  – эквивалентный диаметр, м;  $a$  и  $b$  – размеры сечения шахты, м.

В качестве выводов по проведенным исследованиям авторы отмечают, что воздухообмен с использованием вытяжных шахт горизонтальных систем естественной вентиляции целесообразно осуществлять в холодный период года из рабочей зоны, т. е. нижним срезом шахты, опущенным в зону содержания животных. При такой конфигурации системы обеспечивается удаление вредностей из зоны их образования, сохранение «тепловой» подушки под покрытием, устойчивая равномерная инфильтрация через воздухопроницаемые наружные стены. Данный вариант компоновки вытяжной шахты показан пунктиром на рис. 3.

Вытяжные шахты, используемые для горизонтальной вентиляции, должны быть утеплены для избежания образования конденсата на их внутренней поверхности, а также иметь в нижнем сечении технологический шибер для ручной регулировки расхода удаляемого воздуха.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бодров, М. В. Микроклимат производственных сельскохозяйственных зданий и сооружений / В. И. Бодров, М. В. Бодров, Е. Г. Ионычев, М. Н. Кучеренко ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2008. – 623 с. – ISBN 978-5-87941-526-1. – Текст : непосредственный.
2. Бодров, М. В. Отопление и вентиляция животноводческих и птицеводческих зданий / М. В. Бодров ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2012. – 145 с. – ISBN 978-5-87941-824-8. – Текст : непосредственный.
3. Бодров, М. В. Основы создания энергоэффективных животноводческих зданий / М. В. Бодров, А. Е. Руин, А. Ф. Юланова. – Текст : непосредственный // Теоретические основы теплогасоснабжения и вентиляции : сборник докладов IX Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика РААСН В. Н. Богословского, г. Москва, 19–21 апреля 2023 г. / Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – Москва, 2023. – С. 39-46. – ISBN: 978-5-7264-3250-2.
4. Егиазаров, А. Г. Отопление и вентиляция сельскохозяйственных зданий / А. Г. Егиазаров, О. Я. Кокорин, Ю. М. Прыгунов. – Киев : Будівельник, 1976. – 223 с. – Текст : непосредственный.



5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия : свод правил : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр : актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* : введен в действие с 4 июня 2017. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318?ysclid=m26qaj49pg532340959>. – Текст : электронный.

6. СП 131.13330.2020. Строительная климатология : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2020 г. N 859/пр : введен в действие с 25 июня 2021 г. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358?ysclid=m26qgrrh42342877058>. – Текст : электронный.

7. Валов, В. М. Энергосберегающие животноводческие здания (Физико-технические основы проектирования) / В. М. Валов. – Москва : АСВ, 1997. – 310 с. – ISBN 5-87829-027-8. – Текст : непосредственный.

**BODROV Mikhail Valerevich, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of heating and ventilation; RUIN Aleksey Evgenevich, assistant of the chair of heating and ventilation; YULANOVA Alina Fanilevna, assistant of the chair of heating and ventilation; BESHLYAGA Artyom Vladislavovich, master degree student of the chair of heating and ventilation**

#### **THE USE OF HORIZONTAL NATURAL VENTILATION SYSTEMS IN ANIMAL HUSBANDRY**

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: + 7 (831) 430-54-85;  
e-mail: tes84@inbox.ru.

*Key words:* horizontal ventilation system, heat loss, wind pressure, energy saving.

---

*The rationale for the use of energy-efficient horizontal ventilation systems in livestock buildings in the cold season is given. The authors have developed the thermophysical and aerodynamic foundations of the horizontal system of natural ventilation of cowsheds, which reduces energy consumption and increases the operational reliability of livestock buildings and structures.*

---

#### REFERENCES

1. Bodrov M. V., Bodrov V. I., Ionychev E. G., Kucherenko M. N. Mikroklimat proizvodstvennykh selskohozyaystvennykh zdaniy i sooruzheniy [Microclimate of industrial agricultural buildings and structures]. N. Novgorod, NNGASU, 2008, 623 p.
2. Bodrov M. V. Otoplenie i ventilyaciya zhivotnovodcheskikh i pticevodcheskiy zdaniy [Heating and ventilation of livestock and poultry buildings]. N. Novgorod, NNGASU, 2012, 145 p.
3. Bodrov M. V., Ruin A. E., Yulanova A. F. Osnovy sozdaniya energoeffektivnykh zhivotnovodcheskikh zdaniy [Fundamentals of creating energy-efficient livestock buildings]. Teoreticheskie osnovy teplogazosnabzheniya i ventilyacii [Theoretical foundations of heat and gas supply and ventilation]: sbornik dokladov IX Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika RAASN V. N. Bogoslovskogo, 19–21 aprelya 2023 g. Moscow, Izd. MISI-MGSU, 2023. P. 39–46.



4. Egiazarov A. G., Kokorin O. Ya., Prygunov Yu. M. Otoplenie i ventilyaciya selskohozyajstvennykh zdaniy [Heating and ventilation of agricultural buildings]. Kiev, Budivelnik, 1976, 223 p.

5. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and impacts]: svod pravil : utverzhden Prikazom Min-va stroit. i zhilischno-kommun. khozyaystva RF ot 3 dekabrya 2016 g. № 891/pr : aktualizirovannaya redaktsiya SNIP 2.01.07-85\* : vveden v deystvie 04. 06. 2017. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318?ysclid=m26qaj49pg532340959>.

6. SP 131.13330.2020. Stroitel'naya klimatologiya [Construction climatology]: svod pravil : utverzhden prikazom Min-va stroit. i zhilischno-kommun. khozyaystva RF ot 24 dekabrya 2020 g. N 859/pr : vveden v deystvie s 25.06.2021 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358?ysclid=m26qgrrh42342877058>.

7. Valov V. M. Energoberegayushchie zhivotnovodcheskie zdaniya (Fiziko-tekhicheskie osnovy proektirovaniya) [Energy-saving livestock buildings (Physico-technical fundamentals of design)]. Moscow, Izd. ASV, 1997, 310 p.

© М. В. Бодров, А. Е. Руин, А. Ф. Юланова, А. В. Бешляга, 2024

Получено: 05.10.2024 г.