

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАЙОНОВ

**ЖИЛА Виктор Андреевич**, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**СОЛОВЬЕВА Елена Борисовна**, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**КОРЫТИНА Татьяна Юрьевна**, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*Проведен анализ двух систем газораспределения, связанный с развитием перспективных направлений в газовой отрасли. Для сокращения расходов в системе газораспределения предлагается использовать высокое и среднее давление газа, за исключением жилых зданий. Перед каждым сельскохозяйственным объектом необходимо предусмотреть размещение шкафной установки. При гидравлическом расчете тупиковой газовой сети высокого и среднего давлений применялся метод рационального распределения перепадов давления между участками газовой сети. Это позволило определить оптимальную величину диаметров, что связано с сокращением расходов на строительство газопроводов в сельском хозяйстве.*

**Введение.** Российская Федерация является одной из ведущих газовых держав мира. На данный момент перед государством стоит задача по увеличению степени газификации страны, а также разрабатываются различные программы для обеспечения роста экспорта газа в другие государства.

Поскольку страна обладает большими запасами природного газа и, учитывая все достоинства данного вида топлива, актуальность данной работы состоит в том, что в настоящее время государство ориентировано на развитие системы газораспределения. При этом следует подчеркнуть, что для достижения высоких результатов в данном вопросе необходимо учитывать современные требования и применять инновационные решения в вопросах газораспределения [3].

В настоящее время наибольшее распространение получили двухступенчатые системы газораспределения. Основным элементом этой системы являются газопроводами низкого давления, газопроводы среднего или высокого давления, а также газорегуляторные пункты, которые питают сеть низкого давления. Капитальные вложения в газовые сети существенно снижаются, если их проектировать на более высокие давления. Поэтому необходимо стремиться применять сети с максимальным давлением, допустимым по условиям безопасности. Таким образом, основным резервом снижения стоимости городских газовых сетей является перевод наружных сетей низкого давления на высокое и среднее давление [4].

В этом случае возможны два варианта системы газораспределения.

Первый вариант – одноступенчатая система газораспределения среднего давления с комбинированными регуляторами давления с выходным низким давлением.

Второй вариант – двухступенчатая система газораспределения высокого и среднего давления с установкой комбинированных регуляторов давления перед каждым зданием [5]. Изучим современную схему среднего давления.

**Методика исследований.** На рис. 1 перспективная схема газораспределения представлена тупиковой сетью среднего давления.

Задача технико-экономического расчета тупиковой газовой сети сводится к выбору оптимальных диаметров при рациональном распределении перепадов давления между последовательно соединенными участками газопроводов.

Расходы газа приняты за  $Q_i$ , длина участка  $l_i$ . Расчетный перепад давления задан как

$$\delta = P_n^2 - P_k^2. \quad (1)$$

Уравнение гидравлических потерь для каждого участка:

$$\delta P = a \cdot \frac{Q^2}{d^{5,25}} \cdot l. \quad (2)$$

Материальная характеристика сети:

$$k = b \cdot d l. \quad (3)$$

$$\sum_1^n k = \sum_1^n b \cdot a^{0,19} \cdot Q^{0,38} \cdot l^{1,19} \cdot \delta p^{-0,19}. \quad (4)$$

Газораспределительные сети рассчитываются на расчетный перепад давления, т.е. по каждому направлению от точки питания до конечных точек сумма потерь давления должна быть равна расчетному перепаду:

$$\sum \delta p_i - \delta p_p = 0. \quad (5)$$

Число таких уравнений равно числу узлов с заданным давлением, т.е. числу конечных точек. Поскольку необходимо найти минимальную стоимость, то необходимо найти минимум функции (4). Для этого воспользуемся функцией Лагранжа.

Вводим ограничивающие условия:

$$\delta p_1 + \delta p_2 - \delta p_p = 0; \quad (6)$$

$$\delta p_1 + \delta p_3 + \delta p_4 - \delta p_p = 0; \quad (7)$$



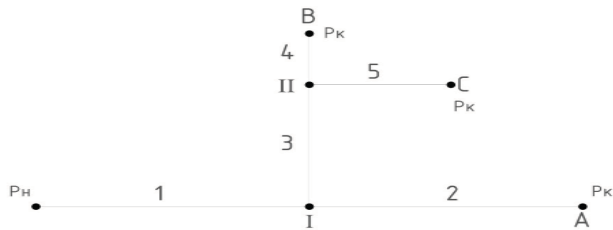


Рис. 1. Схема тупиковой газовой сети

$$\delta p_1 + \delta p_3 + \delta p_5 - \delta p_p = 0. \quad (8)$$

Запишем функцию Лагранжа для данной функции:

$$L = \sum_1^5 b \cdot a^{0,19} \cdot Q^{0,38} \cdot l^{1,19} \cdot \delta p^{-0,19} + \lambda_A (\delta p_1 + \delta p_2 - \delta p_p) + \lambda_B (\delta p_1 + \delta p_3 + \delta p_4 - \delta p_p) + \lambda_C (\delta p_1 + \delta p_3 + \delta p_5 - \delta p_p), \quad (9)$$

где  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$  – коэффициенты Лагранжа. Частные производные

$$\frac{\partial L}{\partial \delta p_1} = -b \cdot a^{0,19} \cdot Q_1^{0,38} \cdot l_1^{1,19} \cdot 0,19 \cdot \delta p_1^{-1,19} + \lambda_A + \lambda_B + \lambda_C = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \delta p_2} = -b \cdot a^{0,19} \cdot Q_2^{0,38} \cdot l_2^{1,19} \cdot 0,19 \times \delta p_2^{-1,19} + \lambda_A = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \delta p_3} = -b \cdot a^{0,19} \cdot Q_3^{0,38} \cdot l_3^{1,19} \cdot 0,19 \times \delta p_3^{-1,19} + \lambda_B + \lambda_C = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \delta p_4} = -b \cdot a^{0,19} \cdot Q_4^{0,38} \cdot l_4^{1,19} \times 0,19 \cdot \delta p_4^{-1,19} + \lambda_B = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \delta p_5} = -b \cdot a^{0,19} \cdot Q_5^{0,38} \cdot l_5^{1,19} \times 0,19 \cdot \delta p_5^{-1,19} + \lambda_C = 0. \quad (14)$$

Исключаем неопределенные множители. Баланс для I узла:

$$Q_2^{0,38} \cdot l_2^{1,19} \cdot \delta p_2^{-1,19} + Q_3^{0,38} \cdot l_3^{1,19} \cdot \delta p_3^{-1,19} - Q_1^{0,38} \cdot l_1^{1,19} \cdot \delta p_1^{-1,19} = 0. \quad (15)$$

Баланс для II узла:

$$Q_4^{0,38} \cdot l_4^{1,19} \cdot \delta p_4^{-1,19} + Q_5^{0,38} \cdot l_5^{1,19} \cdot \delta p_5^{-1,19} - Q_3^{0,38} \cdot l_3^{1,19} \cdot \delta p_3^{-1,19} = 0. \quad (16)$$

Число уравнений равно числу узлов с заданным давлением. Уравнение представляет собой выражение типа  $Q_i^{0,38} \cdot l_i^{1,19} \cdot \delta p_i^{-1,19}$ .

Обозначим:  $A_i = Q_i^{0,38} \cdot l_i^{1,19}$ .

Тогда для разветвленной сети:

$$\sum \delta p_i = \delta p_p; \quad (17)$$

$$\sum A_i \cdot \delta p_i^{-0,19} = 0. \quad (18)$$

Если балансы в узлах не соблюдены:

$$\sum A_i \cdot \delta p_i^{-0,19} = \Delta, \quad (19)$$

где  $\Delta$  – невязка баланса в узлах.

Тогда выражения (15) и (16) примут следующий вид:

$$A_2 \cdot \delta p_2^{-1,19} + A_3 \cdot \delta p_3^{-1,19} - A_1 \cdot \delta p_1^{-1,19} = \Delta_I; \quad (20)$$

$$A_4 \cdot \delta p_4^{-1,19} + A_5 \cdot \delta p_5^{-1,19} - A_3 \cdot \delta p_3^{-1,19} = \Delta_{II}. \quad (21)$$

Предположим, что, введя поправочные узловые давления  $\Delta P_I$  и  $\Delta P_{II}$ , невязка превратилась в ноль. Тогда выражения (20) и (21) примут следующий вид:

$$A_2 \cdot (\delta p_2 + \Delta P_I)^{-1,19} + A_3 \cdot (\delta p_3 + \Delta P_I - \Delta P_{II})^{-1,19} - A_1 \cdot (\delta p_1 + \Delta P_I)^{-1,19} = 0; \quad (22)$$

$$A_4 \cdot (\delta p_4 + \Delta P_{II})^{-1,19} + A_5 \cdot (\delta p_5 + \Delta P_{II})^{-1,19} - A_3 \cdot (\delta p_3 + \Delta P_I - \Delta P_{II})^{-1,19} = 0. \quad (23)$$

Раскладывая выражения в скобках в ряд Маклорена, получаем систему уравнения.

Таким образом, значения поправочных потерь давления:

$$\Delta p' = \frac{\sum A_i \cdot \delta p_i^{-1,19}}{1,19 \cdot \left( \frac{A_i \cdot \delta p_i^{-1,19}}{\delta p_i} \right)}; \quad (24)$$

$$\Delta p'' = \frac{\sum \Delta P_{c.y.} \cdot \left( \frac{A_i \cdot \delta p_i^{-1,19}}{\delta p_i} \right)_{c.y.}}{A_i \cdot \delta p_i^{-1,19} / \delta p_i}; \quad (25)$$

$$\Delta p = \Delta p' + \Delta p''. \quad (26)$$

**Результаты исследований.** На рис. 2 представлены две принципиальные схемы. Справа представлена классическая многоступенчатая схема, которая состоит из сети низкого давления, подсоединенная через ГРП к сети среднего и высокого давления. Слева представлена современная перспективная схема, сеть среднего давления подведена непосредственно к жилым домам и переход на низкое давление осуществляется через комбинированный регулятор давления [2].

Предварительный подбор диаметров осуществляем по постоянному удельному перепаду давления и расчетного расхода на участке сети [6].

Удельный перепад давления определяем по формуле (27):

$$\delta P_{уд.} = \frac{P_{\kappa}^2 - P_{\mu}^2}{1,1 \cdot \sum l} \cdot \frac{\kappa P a^2}{m}, \quad (27)$$

где  $P_{\mu}$  – начальное давление в сети, т.е. давление на



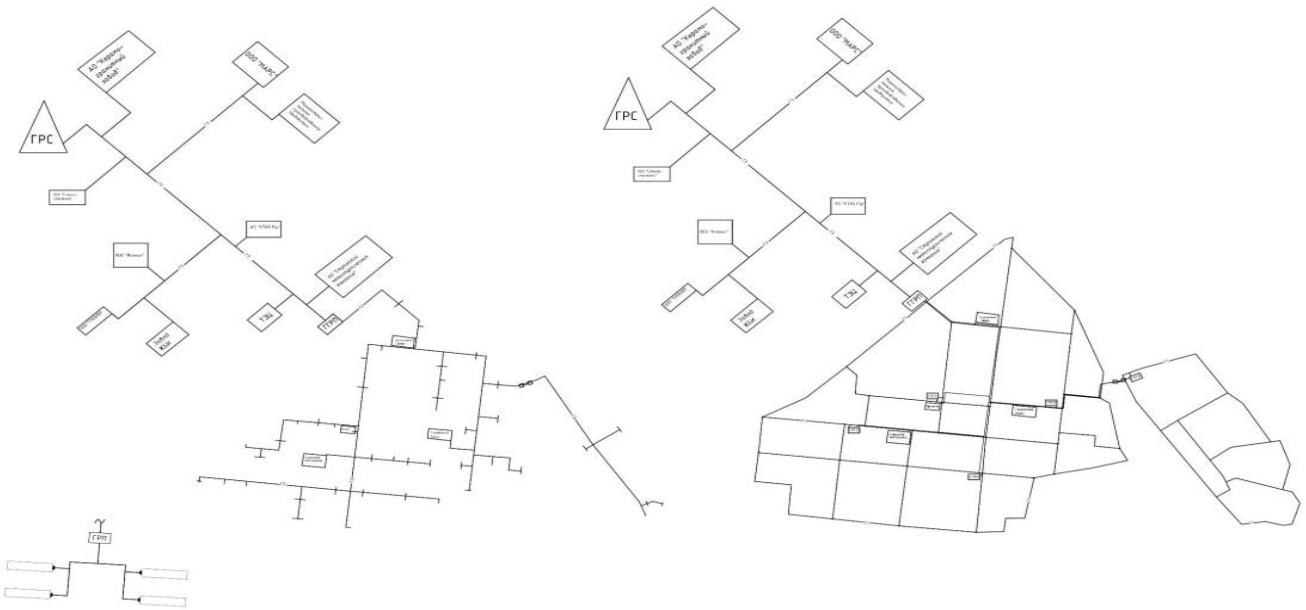


Рис. 2. Принципиальные схемы газораспределения

выходе из ГРП, равное 300 кПа;  $P_k$  – конечное давление в сети, т.е. давление у конечного потребителя, равное 200 кПа;  $\sum l$  – длина газораспределительной сети среднего давления.

$$\delta P_{y.d.} = \frac{300^2 - 200^2}{1,1 \cdot 4602,53} = 9,88, \frac{\text{кПа}^2}{\text{м}}$$

Ориентировочный диаметр газопровода определяется по формуле (28) [7]:

$$d = m \sqrt[1]{\frac{A \cdot B \cdot \rho \cdot Q_0^m}{\delta P_{y.d.}}}, \text{ см}, \quad (28)$$

где  $d$  – расчетный ориентировочный диаметр, см;  $Q_0$  – расчетный расход газа на участке сети, м<sup>3</sup>/ч;  $\rho$  – плотность газа,  $\rho = 0,7$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\delta P_{y.d.}$  – удельный перепад давления на участках сети,  $\frac{\text{кПа}^2}{\text{м}}$ ;  $A, B, m$ , м<sup>1</sup> – коэффициенты, определяемые в зависимости от категории сети (по давлению) и материалу газопровода;  $m = 1,75$  – для полиэтиленовых труб;  $m = 4,75$  – для полиэтиленовых труб;  $B = 0,0446$  – для полиэтиленовых труб;

Коэффициент  $A$  для сетей среднего давления вычисляется по формуле (29):

$$A = \frac{P_0}{P_m \cdot 162 \cdot \pi^2}, \quad (29)$$

где  $P_0 = 0,101325$  МПа – атмосферное давление;  $P_m$  – усредненное давление газа (абсолютное) в сети, равное  $\frac{300 + 200}{2} = 0,25$  МПа;

$$A = \frac{0,101325}{0,25 \cdot 162 \cdot 3,14^2} = 0,00025.$$

По сортаменту принимаем ближайший к ориентировочному диаметру стандартный внутренний диаметр газопровода.

Определяем потери давления на участке по формуле (30):

$$P_n^2 - P_k^2 = \frac{P_0}{81\pi^2} \cdot \lambda \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot \rho_0 \cdot l, \text{ кПа}^2, \quad (30)$$

где  $Q_0$  – расчетный расход газа на участке сети, м<sup>3</sup>/ч;  $l$  – длина участка;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения, определяемый через число Рейнольдса в зависимости от режима течения газа:

$$\text{Обозначим: } A_i = Q_i^{0,38} \cdot l_i^{1,19}$$

Вычисляем ошибку в расчете, которая не должна превышать 10 % по формуле (31):

$$O = \frac{\sum (A_i \cdot \delta P^{1,19})}{0,5 \cdot \sum |A_i \cdot \delta P^{1,19}|} \cdot 100 \% < 10\%. \quad (31)$$

Поправочные потери давления определяем по формуле (32):

$$\Delta P_{y.z.} = \Delta P_{y.z.}^I + \Delta P_{y.z.}^{II}, \text{ кПа}, \quad (32)$$

где  $\Delta P_{y.z.}^I$  – поправка первого порядка, часть поправки без учета влияния соседних узлов, вычисляется по формуле 24;  $\Delta P_{y.z.}^{II}$  – поправка второго порядка, часть поправки, учитывающая влияние соседних узлов, вычисляется по формуле (25).

Окончательные потери давления в узле определяем по формуле (33):

$$P_{y.ч.} = P + \Delta P, \text{ кПа}, \quad (33)$$

где  $\Delta P$  – поправочные потери давления на участке, вычисляемые по формуле (34):

$$P_{y.ч.} = \Delta P_{y.z.} - \Delta P_{c.y.z.}, \text{ кПа}, \quad (34)$$

где  $\Delta P_{c.y.z.}$  – поправочные потери давления соседнего узла (прибавляются к потерям давления на участке с противоположным знаком).

Определяем значения диаметров при новых пере-



падах давления газа, полученных в результате гидравлической увязки. Окончательный расчет диаметров сведен в табл. 1.

Сравним экономию, полученную в результате корректировки диаметров после гидравлической увязки. Определяем экономические затраты по формуле (35):

$$k = b \cdot \sum (d \cdot l), \quad (35)$$

где  $d$  – расчетный ориентировочный диаметр, см;  $l$  – длина участка.

Таким образом, экономические затраты при  $\Delta P/l = \text{const}$  составляют:  $k = 78081 \cdot b$ . Экономические затраты при фактических диаметрах составляют:  $k = 77136 \cdot b$ .

Таким образом, после выполнения гидравлической увязки стоимость сети снижается на 1,2 %.

Определяем экономические затраты на трубопроводы. По каталогу производителя определяем затраты на домовые регуляторы и газорегуляторные, а также стоимость 1 м трубы данного диаметра. Расчеты сведены в табл. 2.

**Заключение.** Таким образом, стоимость инновационной схемы газораспределения на 31,4 % меньше, чем стоимость классической схемы.

Но в то же время необходимо учесть, что переход на высокое и среднее давление связан с обеспечением необходимости предусмотреть меры по обеспечению безопасности систем газораспределения. В дальнейшем необходимо уделить внимание расчету надежности системы газораспределения [1].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жила В.А., Гусарова Е.А., Гулюкин М.Д. Надёжность газораспределительных систем // Научное обозрение. – 2017. – № 20. – С. 38–44.
2. Комплексное энерготехнологическое использование газа и охрана воздушного бассейна / Е.Е. Новгородский [и др.]. – М.: Дело, 1997. – 366 с.
3. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 59 961-2012 Системы газораспределительные. Сети газопотребления. Общие требования к эксплуатации // СПС «Гарант».
4. Приказ Ростехнадзора от 15.11.2013 № 542. «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности» Правила безопасности сетей

Таблица 1

#### Окончательный расчет диаметров

| № уч-ка                    | $Q_p, \text{м}^3/\text{ч}$ | Длина уч-ка, $L, \text{м}$ | $(P_H^2 - P_K^2), \text{кПа}^2$ | $(P_H^2 - P_K^2), \text{МПа}^2$ | $\lambda$ | $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$ | $d_\phi, \text{см}$ | $d_\phi, \text{мм}$ | $P_k, \text{кПа}$ |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| <b>Главное направление</b> |                            |                            |                                 |                                 |           |                              |                     |                     |                   |
| 1                          | 8379,36                    | 701,39                     | 4697,10                         | 0,004697                        | 0,0120    | 0,70                         | 25,68               | 256,79              | 292,07            |
| 2                          | 8065,21                    | 312,01                     | 2074,34                         | 0,002074                        | 0,0121    |                              | 25,35               | 253,47              | 288,49            |
| 3                          | 7813,52                    | 130,55                     | 889,50                          | 0,000890                        | 0,0121    |                              | 24,92               | 249,22              | 286,95            |
| 4                          | 7468,98                    | 123,97                     | 854,46                          | 0,000854                        | 0,0122    |                              | 24,44               | 244,45              | 285,46            |
| 5                          | 3763,36                    | 295,01                     | 1709,81                         | 0,001710                        | 0,0131    |                              | 19,54               | 195,36              | 282,44            |
| 6                          | 3634,84                    | 266,76                     | 1555,13                         | 0,001555                        | 0,0132    |                              | 19,26               | 192,60              | 279,68            |
| 7                          | 3549,99                    | 309,91                     | 1855,97                         | 0,001856                        | 0,0132    |                              | 18,99               | 189,86              | 276,34            |
| 8                          | 3143,66                    | 402,65                     | 2355,20                         | 0,002355                        | 0,0134    |                              | 18,22               | 182,22              | 272,05            |
| 9                          | 2295,73                    | 71,50                      | 410,33                          | 0,000410                        | 0,0139    |                              | 16,25               | 162,49              | 271,29            |
| 10                         | 2066,03                    | 262,40                     | 1532,42                         | 0,001532                        | 0,0141    |                              | 15,56               | 155,62              | 268,45            |
| 11                         | 1142,71                    | 382,12                     | 1902,28                         | 0,001902                        | 0,0151    |                              | 12,86               | 128,61              | 264,88            |
| 12                         | 689,18                     | 120,92                     | 526,63                          | 0,000527                        | 0,0161    |                              | 10,93               | 109,27              | 263,89            |
| 13                         | 511,52                     | 296,27                     | 1230,69                         | 0,001231                        | 0,0167    |                              | 9,87                | 98,66               | 261,55            |
| 14                         | 241,93                     | 481,00                     | 1590,20                         | 0,001590                        | 0,0184    |                              | 7,80                | 77,99               | 258,49            |
| 15                         | 159,56                     | 193,93                     | 568,39                          | 0,000568                        | 0,0196    |                              | 6,85                | 68,54               | 257,39            |
| 16                         | 67,02                      | 252,14                     | 563,46                          | 0,000563                        | 0,0225    |                              | 5,26                | 52,56               | 256,29            |

## Экономическое сравнение сетей среднего и низкого давления

| Тип  | Протяженность, м/ количество, шт. | Стоимость, руб. |
|--|-----------------------------------|-----------------|
| I схема (перспективная)                              |                                   |                 |
| Трубопроводы среднего давления                       | 17548                             | 20 874 442      |
| Трубопроводы высокого давления                       | 8751                              | 27 455 072      |
| Головной газорегуляторный пункт (ГГРП)               | 1                                 | 6 526 990       |
| Квартальные регуляторы давления                      | 41                                | 11 904 227      |
| Домовые регуляторные пункты                          | 404                               | 9 499 252       |
|  | Итого                             | 76 259 983      |
| II схема (классическая)                              |                                   |                 |
| Трубопроводы низкого давления                        | 36214                             | 52 018 156      |
| Трубопроводы среднего давления, подводящие газ к ГРП | 5615                              | 10 860 507      |
| Трубопроводы высокого давления                       | 8751                              | 27 455 072      |
| Головной газорегуляторный пункт (ГГРП)               | 1                                 | 6 526 990       |
| Газорегуляторные пункты                              | 5                                 | 14 319 950      |
|  | Итого                             | 111 180 675     |

газораспределения и газопотребления. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499061806>.

5. Соловьева Е.Б., Лученинова Д.А., Федорова Т.А. Выбор оптимальной системы газораспределения // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 4. – С. 59–62.

6. Соловьева Е.Б. Анализ режимов работы потребителей среднего и высокого давления при отказах на газопроводах // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 1. – С. 78–81.

7. СП 62.13330.2011 Газораспределительные системы. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200084535>.

**Жила Виктор Андреевич**, д-р техн. наук, проф. кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Националь-

ный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия.

**Соловьева Елена Борисовна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия.

**Корытина Татьяна Юрьевна**, бакалавр, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия.

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.  
Тел.: (495) 781-80-07.

**Ключевые слова:** газораспределение; тупиковая сеть среднего давления; кольцевая схема низкого давления; увязка.

## CHOOSING THE OPTIMAL GAS DISTRIBUTION SYSTEM FOR AGRICULTURAL AREAS

**Zhila Viktor Andreevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Heat and Gas Supply and Ventilation", Moscow State University of Civil Engineering, Russia.

**Solovyova Elena Borisovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Heat and Gas Supply and Ventilation", National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia.

**Korytina Tatyana Yurievna**, Bachelor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia.

**Keywords:** gas distribution; dead-end network of medium pressure; low pressure ring; linkage.

*The analysis of two gas distribution systems related to the development of promising areas in the gas industry is carried out. To reduce costs in the gas distribution system, it is proposed to use high and medium gas pressure, except for residential buildings. In front of each agricultural object, it is necessary to provide for the location of the cabinet installation. In the hydraulic calculation of a dead-end gas network of high and medium pressure, the method of rational distribution of pressure drops between sections of the gas network was used. This made it possible to determine the optimal size of diameters, which is associated with a reduction in the cost of building gas pipelines in agriculture.*

