

УДК 629.063.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-141-153

*О.Н. МЕДВЕДЕВА¹, Н.С. БЕССОНОВА²,**¹Саратовский государственный технический университет
имени Ю.А. Гагарина,**²ООО НПФ «ЭТНА ПЛЮС»*

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕПАДОВ ДАВЛЕНИЯ МЕЖДУ УЧАСТКАМИ ГАЗОВОЙ СЕТИ

По предварительным расчетам оптимальное распределение расчетного перепада давления между участками сети газораспределения и газопотребления в зависимости от характера планировки и застройки населенного пункта позволяет снизить металло- и материалоёмкость сетей до 10–15 % при снижении их стоимости до 4–5 % и является прогрессивным мероприятием. В настоящее время при проведении гидравлических расчетов сетей газораспределения целенаправленно распределением расчетного перепада давления не занимаются. Диаметр газопровода обычно подбирают по расчетному расходу газа и удельным потерям давления на единицу длины участков сети газораспределения. После чего проверяют условие соответствия и не превышения полученного перепада давления нормативному значению, установленному СП 42-101-2003. При невыполнении данного условия проводится некоторая корректировка диаметров из конструктивных соображений.

Целью настоящей работы является проведение дополнительных исследований по обоснованию расчетного перепада давления в газораспределительной системе.

Материалы и методы включают методику оценки эффективности распределения перепадов давления в сети газораспределения.

Вопросу оптимального функционирования газораспределительных систем посвящено большое количество научных публикаций, однако полученные авторами решения и разработанные на их основе рекомендации носят фрагментарный, часто противоречивый характер, поскольку не учитывают всю полноту и многообразие взаимодействия системообразующих факторов.

Проведенные исследования показали, что полученные значения расчетных потерь давления при применении бытовых газоиспользующих установок с пониженным номинальным давлением намного меньше установленных нормативными документами. Как следует из анализа полученных результатов, на величину удельных затрат в системе газоснабжения определяющее влияние оказывают характер застройки населенного пункта, плотность населения на газоснабжаемой территории, а также технические характеристики газоснабжаемых зданий.

Ключевые слова: эффективность; сеть газораспределения; перепад давления; оптимизация; пункт редуцирования; газопровод.

Для цитирования: Медведева О.Н., Бессонова Н.С. Экономическая эффективность оптимального распределения перепадов давления между участками газовой сети // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 6. С. 141–153.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-141-153

O.N. MEDVEDEVA¹, N.S. BESSONOVA²,

¹*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,*

²*ООО "ETNA PLUS"*

OPTIMIZATION OF DIFFERENTIAL PRESSURE DISTRIBUTION BETWEEN GAS SUPPLY SYSTEM SECTIONS

The paper proposes the optimum distribution of the differential pressure between gas supply system sections and gas consumption, depending on the settlement planning and development. This provides a 10–15 % reduction in metal and material consumption of gas supply systems and a 4–5 % cost reduction. The hydraulic analysis of differential pressure distribution does not allow to purposefully distribute the calculated pressure drop. The pipeline diameter is usually selected according to the estimated gas flow rate and specific pressure loss per unit length of gas supply system sections. Then, in accordance with the State standard, the condition of compliance and non-exceedance of the obtained differential pressure is checked with the standard value. If this condition is not met, the pipeline diameter is adjusted for design reasons.

This work conducts additional research into the differential pressure distribution between gas supply system sections. Materials and methods include the assessment methodology for the effectiveness of differential pressure distribution between gas supply system sections.

Although many publications are devoted to the optimization of gas pressure distribution systems, the proposed solutions and the recommendations developed in this paper are fragmentary, often contradictory, since they do not consider the completeness and diversity of strategic factors.

The paper shows that the pressure loss values obtained for domestic gas-based units with a reduced nominal pressure, are much less than those given in regulatory documents. According to the analysis, the settlement development, population density in gas-supplied territories, and technical conditions of gas-supplied buildings, have a decisive influence on the unit costs of gas supply systems.

Keywords: efficiency; gas supply system; differential pressure; optimization; reduction; pipeline.

For citation: Medvedeva O.N., Bessonova N.S. Ekonomicheskaya effektivnost' optimal'nogo raspredeleniya perepadov davleniya mezhd u chastkami gazovoi seti [Optimization of differential pressure distribution between gas supply system sections]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 6. Pp. 141–153. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-141-153

Введение

Особая роль природного газа в решении энергетических и экологических проблем связана как с абсолютными объемами его потребления, технологическим прогрессом, так и с появлением новых качественных решений. Важным направлением обеспечения надежности и безопасности функционирования существующих газораспределительных систем является внедрение новых прогрессивных технологий, материалов, технологического оборудования, средств измерения и метрологии, обеспечивающих высокую экономическую эффективность, надежность и безопасность систем [1–4].

При одинаковом уровне благоустройства расходы топлива на жилищно-коммунальный сектор в малых населенных пунктах (коттеджных поселках) будут выше, чем в городах, соответственно, потребуются большие капитальные вложения в системы энергоснабжения из-за более высокой удельной стоимости

мелких установок и меньшей тепловой плотности. Основным направлением снижения капитальных затрат и расхода топлива в малых населенных пунктах является разработка и внедрение более экономичных инженерных решений, отличных от городской практики, для разнообразных конкретных условий. Так, если в городах системы энергоснабжения выполняются, как правило, централизованными, то в поселках экономически целесообразным представляется применение как централизованных, так и автономных систем [3, 5].

Основными функциональными элементами газораспределительной системы населенных пунктов и коттеджных поселков являются газораспределительные сети различных категорий давления, блочные газорегуляторные пункты, пункты редуцирования газа шкафные, газоиспользующие приборы и оборудование [4]. В этой связи проблемы оптимального функционирования поселковых систем газораспределения и газопотребления представляют собой сложную научно-техническую задачу, эффективное решение которой требует глубокой системной проработки вопроса с учетом многообразия системообразующих связей и факторов технологического, энергетического и экологического характера.

Как уже было отмечено в публикациях [5–7], к числу важнейших предпосылок к реализации математической модели оптимальной централизации распределительных систем газоснабжения на базе пунктов редуцирования газа относится обоснование расчетного перепада давления в сетях газораспределения и газопотребления и его оптимальное распределение между структурными участками сети.

Как известно, газоиспользующее оборудование для бытовых нужд потребителей выпускается для двух значений номинальных давлений газа: $\Delta P_{\text{ном}} = 1274$ Па и $\Delta P_{\text{ном}} = 1960$ Па. Как правило, при применении газоиспользующих приборов с повышенным номинальным давлением снижается металлоемкость сетей газораспределения [8, 9], однако необходимо следить за герметичностью коммуникаций во избежание утечек газа и образования взрывоопасных газовоздушных смесей [10]. Характер работы газоиспользующего оборудования предопределяет гидравлические режимы эксплуатации газовых сетей, и рабочее давление газа перед газоиспользующим оборудованием отличается от номинального значения [8]. Имеющийся в сети газораспределения (рассчитанной на нормативный перепад давления в виде значения $\Delta P_p \leq 1800$ Па) перепад давления не используется полностью, и сеть оказывается дороже, поскольку оборудование, подключенное вблизи пунктов редуцирования (в начале трассы), работает при максимальных значениях давления газа $P_{\text{макс}}^{\text{приб}}$, а газоиспользующее оборудование, подключенное на значительном удалении от пунктов редуцирования, работает при минимальных значениях давления газа $P_{\text{мин}}^{\text{приб}}$ [8].

Как показали исследования, рекомендуемая СП 42-101-2003 величина располагаемого (расчетного) перепада давления продиктована в основном требованиями к надежной и безопасной работе газоиспользующего оборудования без учета потери давления в счетчиках газа, особенностей гидравлических режимов работы пунктов редуцирования и влияния давления

газа на величину коэффициента полезного действия [8, 11–15], поэтому задача обоснования требует проведения дополнительных исследований.

Обзор исследований

Выбору расчетного перепада давления и его распределения по участкам сети газораспределения было посвящено значительное количество научных публикаций, датированных 60–70 гг. прошлого столетия [9, 16, 17]. Адекватное решение задачи оптимального распределения перепада давления в сетях газораспределения должно отражать специфические особенности современных газораспределительных систем, при этом, как показали исследования [8], необходимо учитывать тот факт, что неустойчивость давления газа у потребителей напрямую зависит от величины расчетного перепада давления и уровня его расходования по маршруту движения газового потока от источника до газоиспользующего оборудования, от режима работы этих установок и способа редуцирования давления газа. Нормальное функционирование газового оборудования возможно только при условии обеспечения устойчивого значения давления газа перед ними, что достигается в большей степени правильным выбором способа регулирования начального давления газа [8, 13, 18]. Как известно, надежная, безопасная и экономичная работа газоиспользующего оборудования обеспечивается при значении давления газа, близком к номинальному. При номинальном давлении создаются наиболее благоприятные условия для сжигания газа, горелки газоиспользующего оборудования работают устойчиво и обеспечивают необходимую полноту сгорания газа с максимальным коэффициентом полезного действия [17–20]. Предельно допустимые изменения давления газа для бытовых газовых приборов закреплены соответствующими нормативными документами. Универсализируя эти данные, примем по всей номенклатуре газовых приборов следующие значения [5]:

– для бытового газоиспользующего оборудования, запроектированного на номинальное давление $\Delta P_{\text{ном}} = 2000$ Па, $\Delta P_{\text{max}} = 2500$ Па, $\Delta P_{\text{min}} = 1700$ Па. Тогда максимальное значение допустимого перепада давления, реализуемого в распределительной системе газоснабжения, составит $\Delta P_{\text{max}} = 800$ Па;

– для бытового газоиспользующего оборудования, запроектированного на номинальное давление $\Delta P_{\text{ном}} = 1300$ Па, $\Delta P_{\text{max}} = 1764$ Па, $\Delta P_{\text{min}} = 650$ Па. Тогда максимальное значение допустимого перепада давления, реализуемого в распределительной системе газоснабжения, составит $\Delta P_{\text{max}} = 1114$ Па.

Газоиспользующее оборудование, работающее на пониженном номинальном давлении, имеет большую устойчивость к проскоку и отрыву пламени, при этом повышается степень безопасности газораспределительных систем. Этими обстоятельствами и объясняется увеличение размера допустимого перепада давления, поэтому использование оборудования с номинальным давлением $P_{\text{ном}}^{\text{приб}} = 1300$ Па более рационально [8].

Материалы и методы

В современных условиях газоснабжения потребителей популярность набирают системы, включающие в себя сети газораспределения среднего дав-

ления с установкой непосредственно перед газоиспользующим оборудованием устройства снижения давления газа до номинального. Наиболее широкое распространение такие системы получили в районах с одно-, двухэтажной застройкой [4, 13, 19, 20].

Вопрос неравномерной подачи газа потребителю по сетям газораспределения низкого давления газа до сих пор остается актуальным (рис. 1).

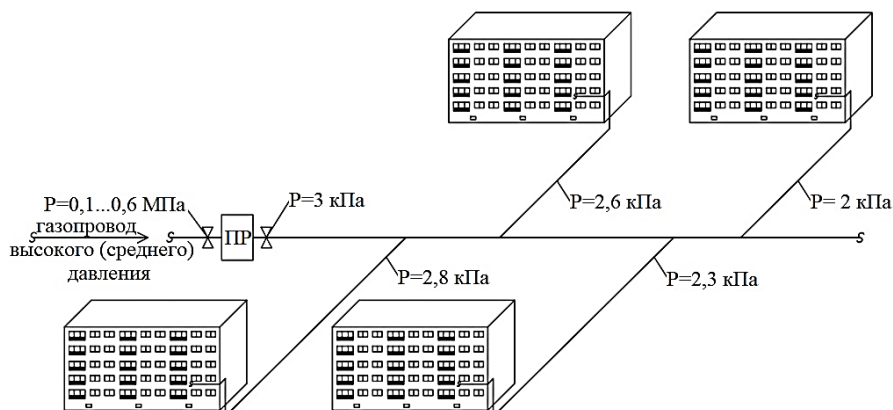


Рис. 1. Газораспределительная сеть низкого давления

Не меньшую проблему представляет собой и подключение нового газоиспользующего оборудования, работающего на разных номинальных давлениях (1300, 2000 или 3000 Па) к уже существующим сетям низкого давления газа. Работа всего оборудования в номинальном режиме в таком случае не подразумевается. При повышенном давлении в сетях газопотребления низкого давления газа автоматика безопасности не всегда срабатывает должным образом [10, 21]. В этом случае наилучшим решением проблемы является установка регуляторов давления газа непосредственно перед отводом трубопровода к жилым домам с повышением входного давления до 12 кПа на выходе из пункта редуцирования (рис. 2).

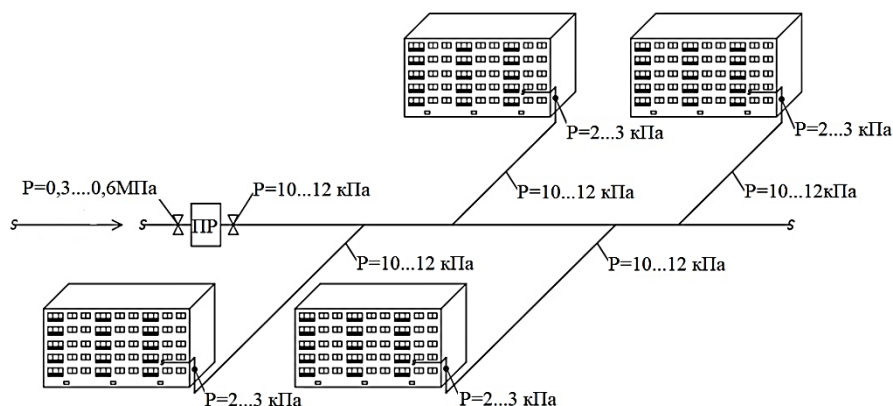


Рис. 2. Газораспределительная сеть при повышенном давлении с применением регуляторов давления газа

Основной задачей сетей газораспределения и газопотребления является обеспечение бесперебойной работы газоиспользующего оборудования у потребителей [3, 9, 10, 22–24]. При прокладке/замене газопроводов нельзя не учитывать потери давления. Так, суммарные потери от пункта редуцирования до конечного потребителя могут превышать 1,5 кПа [16, 25, 26]. Такие «скачки» давления не могут пройти бесследно для газоиспользующего оборудования. Как показали исследования, изменение коэффициента полезного действия на 1 % происходит при изменении фактического давления газа на 80–100 Па [8].

Разрешенная степень отклонения мощности газоиспользующего оборудования определяется его паспортными данными и, в частности, коэффициентом предельного регулирования $K_{пр}$. Коэффициент предельного регулирования определяет границы отклонения давления на входе в газоиспользующее оборудование от установленного для него номинального значения. Данный диапазон давлений является оптимальным для стабильной и безопасной работы газоиспользующего оборудования [8, 25].

Как показал проведенный анализ, располагаемый расчетный перепад давления в распределительных газопроводах от пунктов редуцирования составляет:

– для газоиспользующего оборудования с номинальным давлением $P_{ном}^{приб} = 1300$ Па: $\Delta P_p = 596–914$ Па;

– для газоиспользующего оборудования с номинальным давлением $P_{ном}^{приб} = 2000$ Па: $\Delta P_p = 150–600$ Па.

Многолетний опыт проектирования АО «Гипрониигаз» показал, что по ряду причин не всегда удастся полностью использовать располагаемый перепад давления (при величине $Z = 1$). Крайнее значение использования данного параметра составляет 50 % ($0,5 \cdot Z$) и еще более редкого – 25 % ($0,25 \cdot Z$) [10]. Численное значение $Z = 1$ представляет собой максимальное использование располагаемого квадратичного и линейного перепада величин абсолютных давлений для всех категорий газопроводов.

Как показали результаты расчетов [5, 8, 10], неполное использование располагаемого перепада давления значительно повышает величину затрат в газораспределительную систему 3 и существенно увеличивает опасность выбросов газа из поврежденного газопровода V . Например, при использовании расчетного перепада давления на 50 % ($0,5 \cdot Z$) для газопроводов высокого и среднего давления величина затрат возрастает почти на 15 %, а опасность выбросов – на 30 %; для газопроводов низкого давления – на 16 и на 35 % соответственно. То есть во всем диапазоне возрастание вероятности выбросов по сравнению с величиной затрат в процентном соотношении примерно в 2 раза больше. Эта закономерность распространяется как на газопроводы высокого и среднего давления, так и на газопроводы низкого давления [10].

Таким образом, проведение гидравлического расчета системы из условия наиболее полного использования располагаемого расчетного перепада давления является условием снижения затрат в сооружение и эксплуатацию газораспределительной системы. Наряду с этим его наличие создает пониженное давление

газа перед газовыми приборами, вследствие чего понижается тепловая эффективность газоиспользующего оборудования, увеличивается расход газа и, как следствие, стоимость потребляемого топлива. Поэтому для обоснования оптимального расчетного перепада давления в уличных газовых сетях требуется проведение дополнительных технико-экономических исследований.

Целевой функцией задачи являются дисконтированные затраты в газораспределительную систему, состоящую из распределительных газопроводов и газоиспользующего оборудования (бытовые газовые плиты, отопительные котлы и газовые водонагреватели).

Сделав допущение, что дисконтированные затраты в газоиспользующие установки не зависят от величины располагаемого расчетного перепада давления, представим переменную часть целевой функции в следующем виде:

$$Z = Z_{\text{ГС}}(V, \Delta P, n, q, s) + \Delta T [\eta_{\text{Г}} \{P_{\text{Г}}(\Delta P)\}, V_{\text{год}}] = \min,$$

где Z – суммарные дисконтированные затраты в газораспределительную систему, руб/(год·кв.); $Z_{\text{ГС}}$ – дисконтированные затраты в распределительные газопроводы, руб/(год·кв.); ΔT – приращение годовой стоимости газа за счет снижения тепловой эффективности газоиспользующего оборудования, руб/(год·кв.); q – плотность населения, чел./м²; s – средняя заселенность квартир, чел./кв.; n – оптимальное количество квартир (домов), подключаемых к одному пункту редуцирования, кв; V – максимальный часовой расход газа одной квартирой, м³/(ч·кв.), принимается в зависимости от характера газоиспользующего оборудования и режимов его эксплуатации; $V_{\text{год}}$ – годовой расход газа одной квартирой, м³/(год·кв.); ΔP – оптимальный расчетный перепад давления в газопроводах, Па; $\eta_{\text{Г}}$ – коэффициент полезного действия газоиспользующего оборудования, %, принимается в зависимости от давления используемого газа, Па.

Результаты исследований

Целевая функция имеет сложный характер, в этой связи для определения оптимальной величины проектного параметра ΔP_{opt} целесообразно использовать метод вариантных технико-экономических расчетов с применением ЭВМ. Выполнение расчетов по данному методу сводится к следующему: задаваясь несколькими значениями параметра $\Delta P_1; \Delta P_2; \dots, \Delta P_n$, определяем значение критерия $Z_1; Z_2; \dots, Z_n$. Оптимальное значение потери давления в уличном газопроводе ΔP_{opt} определяет минимум целевой функции Z_{min} .

При численной реализации математической модели, например, для котельной, работающей на природном газе, было получено значение потери давления $\Delta P_{\text{opt}} = 120$ Па, соответствующее минимальному значению дисконтированных затрат в проектируемую систему и являющееся оптимальным. Полученная величина в пять раз меньше предельно допустимого значения расчетного перепада давления, установленного ранее ($\Delta P_{\text{min}}^P = 596$ Па). Анализ полученных результатов показывает, что оптимизация потерь давления

в уличных газовых сетях позволяет получить значительную экономию дисконтированных затрат в сооружение и эксплуатацию проектируемой газораспределительной системы. Например, при расчетном перепаде давления $\Delta P_{\min}^p = 596$ Па имеем снижение затрат на 42,2 % в относительном выражении. Еще одним положительным результатом оптимизации потерь давления в сетях газораспределения является повышение величины давления газа перед газоиспользующим оборудованием и, как следствие, повышение общей эффективности использования газового топлива.

Тогда приращение оптимального давления газа

$$\Delta P_{opt} = \frac{\Delta P_{\min}^p - \Delta P_{opt}}{P_{\text{приб}}^{\text{ном}}} = \frac{596 - 120}{1300} = 0,37.$$

При этом приращение относительного коэффициента полезного действия $\Delta \eta_{\text{отн}}$ составит 2,3 %, а годовая экономия газа за счет повышения тепловой эффективности оборудования превысит 850 м³/год.

Предложенную математическую модель оптимизации потери давления для транзитного газопровода можно использовать для определения обоснованной величины потери давления в уличных газораспределительных системах от индивидуальных пунктов редуцирования.

При проведении расчетов использовались следующие данные:

1. Параметры газоснабжаемых зданий:

– усадебные здания с существующим уровнем теплозащиты; газоиспользующее оборудование: газовые плиты и газовые отопительные печи периодического действия;

– усадебные здания с экономически целесообразным уровнем теплозащиты; газоиспользующее оборудование: газовые плиты и отопительные котлы;

– коттеджные здания с экономически целесообразным уровнем теплозащиты; газоиспользующее оборудование: газовые плиты и отопительные котлы двухцелевого назначения.

2. Климатические зоны эксплуатации зданий: умеренно теплая, холодная.

3. Площадь индивидуальных земельных участков – 4 и 50 соток.

4. Режимы работы пункта редуцирования: с минимальным и максимальным выходным давлением газа.

В качестве примера на рис. 3 представлена графическая интерпретация результатов расчетов применительно к коттеджным зданиям.

Из анализа результатов следует, что наряду с потерей давления в уличном газопроводе на величину дисконтированных затрат значительное влияние оказывают техническая оснащенность зданий, газоиспользующее оборудование и режимы его эксплуатации, архитектурно-планировочные решения по застройке населенных пунктов (площадь индивидуального земельного участка) и климатическая зона.

Например, при значении ΔP 250 Па величина дисконтированных затрат изменяется от 171 050 руб./(год·кв.) (усадебные здания с существующим уровнем тепловой защиты, эксплуатируемые в условиях холодной климатической зоны, газоиспользующее оборудование: газовые плиты и газовые отопительные

печи периодического действия, площадь приусадебного участка – 50 соток) до 91 620 руб./(\text{год} \cdot \text{кв.}) (усадебные здания с повышенным уровнем тепловой защиты, эксплуатируемые в условиях умеренно теплой климатической зоны, газоиспользующее оборудование: газовые плиты и газовые котлы непрерывного действия, площадь приусадебного участка – 4 сотки), т. е. почти в 2 раза.

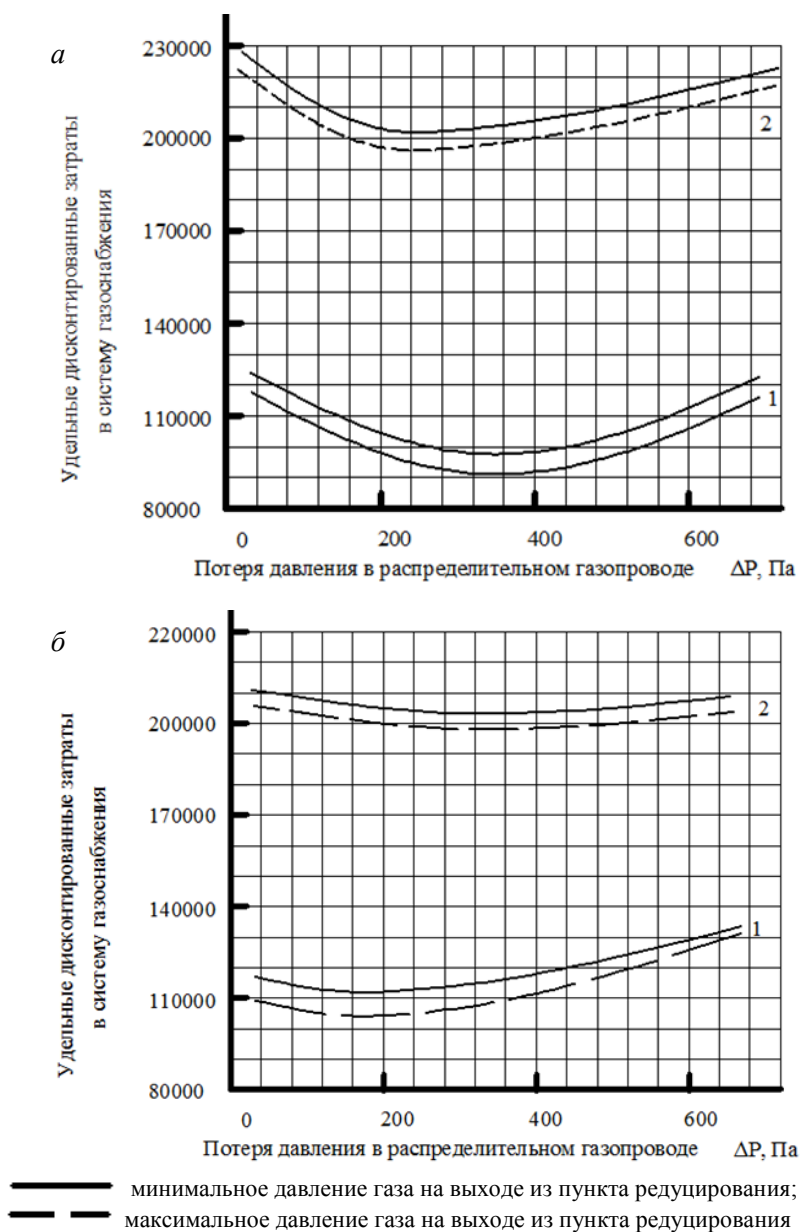


Рис. 3. К определению оптимальных потерь давления:

а – условия умеренно теплой климатической зоны; *б* – условия холодной климатической зоны; 1 – площадь приусадебного участка 4 сотки; 2 – площадь приусадебного участка 50 соток

Одновременно с этим режимы эксплуатации пункта редуцирования (значения максимальных или минимальных давлений газа на выходе из источника) практически не изменяют величину дисконтированных затрат (расхождение по затратам не превышает 3–4 %). Как следует из анализа графиков, в указанных диапазонах изменения исходных параметров оптимальные значения потери давления в уличном газопроводе изменяются в широких пределах – от 150 до 350 Па. В то же время наличие заметной пологости целевой функции в районе экстремума дает возможность применять в качестве обобщенной рекомендации для использования в проектной практике значения $\Delta P_{opt} = 250$ Па. При этом погрешность решения задачи не превышает 4–5 %.

Рекомендуемое значение оптимальной потери давления ΔP_{opt} гораздо меньше величины предельно допустимого перепада давления ($\Delta P_{min}^p = 596$ Па) и нормативной величины, установленной СП 42-101-2003 для дворовых и внутридомовых газопроводов, $\Delta P_H = 600$ Па.

Заключение

Результаты численной реализации математической модели оптимизации потерь давления показывают снижение годовых затрат в относительном выражении более чем на 10 %. При этом экономия годовых затрат на газовое топливо составляет 30–50 тыс. руб./ (год·кв.) при годовой экономии газа в размере 250–400 м³/ (год·кв.). Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что оптимизация потери давления в сетях газораспределения обеспечивает значительную экономию дисконтированных затрат в газораспределительную систему, обеспечивая адекватную экономию газового топлива без снижения тепловой эффективности работы газоиспользующего оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кусильдин Т.Р., Дмитриев М.Е., Мастобаев Б.Н. Актуальные проблемы развития газовых сетей и основные направления повышения эксплуатационной надежности газораспределительных систем // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 3. С. 40–45.
2. Медведева О.Н. Рекомендации по выбору оптимальных параметров систем газоснабжения населенных пунктов // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 515–519.
3. Левин А.М. Системы газоснабжения городов и населенных пунктов. Минск : БПИ, 1990. 74 с.
4. Горелов С.А. Сооружение и реконструкция распределительных систем газоснабжения. Москва : Недра-бизнесцентр, 2002. 294 с.
5. Medvedeva O.N. Comparative evaluation of the energy and economic efficiency the gas supply systems of small towns // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2018. № 1 (37). P. 29–41.
6. Бессонова Н.С. Выбор источника газоснабжения сельских населенных пунктов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2020. № 4 (43). С. 278–283.
7. Медведева О.Н., Бессонова Н.С. Сравнительная оценка энергоэкономической эффективности поселковых систем газоснабжения // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 3 (47). С. 21–31.
8. Медведева О.Н., Бессонова Н.С. Методика оценки тепловой эффективности газоиспользующих аппаратов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 2 (75). С. 108–120.

9. Левин А.М. Расчетные режимы давления газа в сетях низкого давления // Газовая промышленность. 1956. № 4. С. 24–30.
10. Фастов Л.М., Медведева О.Н. Надежность систем газоснабжения. Саратов : СГТУ, 2012. 148 с.
11. Ходжаев Ш.Т. Вычислительный эксперимент анализа и оценки сезонной неравномерности регулирования потока газа на выходе ГРП // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 2 (5). С. 233–238.
12. Савастиев А.Я. Ресурсосберегающая методика гидравлического расчета распределительных газопроводов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: международный научно-технический и производственный журнал. 2007. № 4. С. 57–65.
13. Бадалова М.Ш., Норова И.П. Гидравлический расчет уличной газораспределительной сети низкого давления // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 1 (4). С. 40–43.
14. Медведева О.Н. Моделирование и оптимизация распределительных систем газоснабжения сетевым природным газом // Архитектура и строительство России. 2009. № 12. С. 18–25.
15. Лепихин А.П. К оценке коэффициента гидравлического сопротивления в гладких трубах // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8. № 4. С. 369–375.
16. Николаев А.К., Дыкин А.К., Фидусь А.И. Уменьшение гидравлического сопротивления при транспорте газа по газораспределительным системам // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. 2020. № 3,5 (99,5). С. 60–70.
17. Баясанов Д.Б. Автоматическое регулирование и управление в городских газовых сетях. Москва : Стойиздат, 1970. 192 с.
18. Смирнов В.А. Оптимальные перепады давления в газопроводах // Использование газа в народном хозяйстве. Саратов : Коммунист, 1965. С. 26–33.
19. Тихомиров С.А., Гришин Г.С., Маринченко В.А. Влияние падения нагрузки потребителей на оптимальную величину давления источника газоснабжения // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2017/4201 (дата обращения: 31.08.2020).
20. Agegnehu A., Tilahun M. Modeling and Simulation of Real Gas Flow in a Pipeline // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2016. № 4. P. 1652–1681.
21. Mel'kumov V.N., Chujkin S.V., Papshickij A.M., Sklyarov K.A. Modelling of structure of engineering networks in territorial planning of the city // Scientific Herald of the Voronezh state university of architecture and civil engineering. Construction and architecture. 2015. № 4 (28). P. 33–40.
22. Сазонова С.А., Николенко С.Д., Манохин В.Я. Численная апробация математических моделей мониторинга безопасного функционирования систем газоснабжения // Известия КГАСУ. 2016. № 1 (35). С. 255–264.
23. Сьянов С.Л. Численное и экспериментальное исследование потерь напора в трубе переменного сечения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2013. № 2. С. 176–185.
24. Иниаков Р.С., Балабуха А.В., Анисимова Е.Ю. и др. Применение завихрителя потока движущейся среды для снижения гидравлических потерь в трубопроводах // Вестник Евразийской науки. 2018. № 3. URL: <https://esj.today/PDF/36SAVN318.pdf> (дата обращения: 31.08.2020).
25. Goodland R. Oil and Gas Pipelines. Virginia USA : McLean, 2005. 190 p.
26. Курицын Б.Н., Медведева О.Н., Иванов А.А. Влияние давления газа на эффективность его использования // Приволжский научный журнал. Нижний Новгород : ННГАСУ. 2009. № 3 (11). С. 65–69.
27. Прокутинский А.О., Комина Г.П. О реконструкции городских газораспределительных сетей низкого давления // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17748> (дата обращения: 31.08.2020).

REFERENCES

1. Kuskil'din T.R., Dmitriev M.E., Mastobaev B.N. Aktual'nye problemy razvitiya gazovyh setej i osnovnye napravleniya povysheniya ekspluatacionnoj nadezhnosti gazoraspredeletel'nyh sis-

- tem [Actual problems and main directions of gas supply system development and reliability]. *Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya*. 2016. No. 3. Pp. 40–45. (rus)
2. *Medvedeva O.N.* Rekomendacii po vyboru optimal'nyh parametrov sistem gazosnabzheniya naselennyh punktov [Recommendations on choosing optimal parameters of gas supply systems for settlements]. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 7. Pp. 515–519.
3. *Levin A.M.* Sistemy gazosnabzheniya gorodov i naselennyh punktov [Gas supply systems for cities and towns]. Minsk: BPI, 1990. 74 p. (rus)
4. *Gorelov S.A.* Sooruzhenie i rekonstrukciya raspredelitel'nyh sistem gazosnabzheniya [Construction and reconstruction of gas distribution systems]. Moscow: Nedra-biznescentr, 2002. 294 p. (rus)
5. *Medvedeva O.N.* Comparative evaluation of the energy and economic efficiency the gas supply systems of small towns. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2018. No. 1 (37). Pp. 29–41.
6. *Bessonova N.S.* Vybory istochnika gazosnabzheniya sel'skih naselennyh punktov [Choosing gas supply source for rural settlements]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2020. No. 4 (43). Pp. 278–283. (rus)
7. *Medvedeva O.N., Bessonova N.S.* Sravnitel'naya ocenka energoekonomicheskoy effektivnosti poselkovykh sistem gazosnabzheniya [Comparative assessment of energy-economic efficiency of gas supply systems]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arhitektury*. 2017. No. 3(47). Pp. 21–31. (rus)
8. *Medvedeva O.N., Bessonova N.S.* Metodika ocenki teplovoj effektivnosti gazoispol'zuyushchih apparatov [Thermal efficiency assessment of gas-based units]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2019. No. 2 (75). Pp. 108–120. (rus)
9. *Levin A.M.* Raschetnye rezhimy davleniya gaza v setyah nizkogo davleniya [Gas pressure mode calculations for low pressure networks]. *Gazovaya promyshlennost'*. 1956. No. 4. Pp. 24–30. (rus)
10. *Fastov L.M., Medvedeva O.N.* Nadezhnost' sistem gazosnabzheniya [Reliability of gas supply systems]. Saratov: SGTU, 2012. 148 p. (rus)
11. *Hodzhaev Sh.T.* Vychislitel'nyy eksperiment analiza i ocenki sezonnoj neravnomernosti regulirovaniya potoka gaza na vyhode GRP [Computational analysis and assessment of seasonal non-uniformity of gas flow regulation at the output of reduction point]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2016. No. 2 (5). Pp. 233–238. (rus)
12. *Savastienok A.Ya.* Resursosberegayushchaya metodika gidravlicheskogo rascheta raspredelitel'nyh gazoprovodov [Resource-saving method of hydraulic analysis of gas distribution pipelines]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG. Energetika*. 2007. No. 4. Pp. 57–65. (rus)
13. *Badalova M.Sh., Norova I.P.* Gidravlicheskij raschet ulichnoj gazoraspredelitel'noj seti nizkogo davleniya [Hydraulic analysis of low-pressure street gas distribution systems]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2016. No. 1 (4). Pp. 40–43. (rus)
14. *Medvedeva O.N.* Modelirovanie i optimizaciya raspredelitel'nyh sistem gazosnabzheniya setevym prirodnyim gazom [Modeling and optimization of natural gas supply distribution systems]. *Arhitektura i stroitel'stvo Rossii*. 2009. No. 12. Pp. 18–25. (rus)
15. *Lepihin A.P.* K ocenke koefitsienta gidravlicheskogo soprotivleniya v gladkih trubah [Calculation of hydraulic resistance coefficient for smooth pipes]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred*. 2015. V. 8. No. 4. Pp. 369–375. (rus)
16. *Nikolaev A.K., Dykin A.K., Fidus' A.I.* Umen'shenie gidravlicheskogo soprotivleniya pri transporte gaza po gazoraspredelitel'nym sistemam [Reduction in hydraulic resistance during gas transport in gas distribution systems]. *Neftegaz.Ru*. 2020. No. 3,5 (99,5). Pp. 60–70. (rus)
17. *Bayasanov D.B.* Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie v gorodskih gazovyh setyah [Automatic regulation and control in urban gas systems]. Moscow: Stoiizdat, 1970. 192 p. (rus)
18. *Smirnov V.A.* Optimal'nye perepady davleniya v gazoprovodah [Optimal pressure drops in gas pipelines]. In: *Ispol'zovanie gaza v narodnom hozyajstve* [Optimum pressure drops in gas pipelines]. Saratov: Kommunist, 1965. Pp. 26–33. (rus)
19. *Tihomirov S.A., Grishin G.S., Marinchenko V.A.* Vliyanie padeniya nagruzki potrebitelej na optimal'nuyu velichinu davleniya istochnika gazosnabzheniya [Influence of consumer load

- drop on optimal pressure of gas supply system]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2017. No. 2. Available: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2017/4201 (accessed August 31, 2020). (rus)
20. Agegnehu A., Tilahun M. Modeling and simulation of real gas flow in a pipeline. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 2016. No. 4. Pp. 1652–1681.
 21. Mel'kumov V.N., Chujkin S.V., Papshickij A.M., Sklyarov K.A. Modelling of structure of engineering networks in territorial planning of the city. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2015. No. 4 (28). Pp. 33–40.
 22. Sazonova S.A., Nikolenko S.D., Manohin V.Ya. Chislennaya aprobaciya matematicheskikh modelej monitoringa bezopasnogo funkcionirovaniya sistem gazosnabzheniya [Numerical testing of mathematical models for safe functioning monitoring of gas supply systems]. *Izvestiya KGASU*. 2016. No. 1 (35). Pp. 255–264. (rus)
 23. S'yanov S.L. Chislennoe i eksperimental'noe issledovanie poter' napora v trube peremennogo secheniya [Pressure losses in a pipe of variable cross-section]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2013. No. 2. Pp. 176–185. (rus)
 24. Inshakov R.S., Balabuha A.V., Anisimova E.Yu. Primenenie zavivritelya potoka dvizhushchejsya sredi dlya snizheniya gidravlicheskih poter' v truboprovodah [Flow swirling in moving medium for reducing hydraulic loss in pipelines]. *Vestnik Evrazijskoj nauki*. 2018. No. 3. Available: <https://esj.today/PDF/36SAVN318.pdf> (accessed August 31, 2020). (rus)
 25. Goodland R. Oil and gas pipelines. Virginia: McLean, 2005. 190 p.
 26. Kuricyn B.N., Medvedeva O.N., Ivanov A.A. Vliyanie davleniya gaza na effektivnost' ego ispol'zovaniya [Gas pressure efficiency]. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal*. 2009. No. 3 (11). Pp. 65–69. (rus)
 27. Proshutinskij A.O., Komina G.P. O rekonstrukcii gorodskih gazoraspredeletel'nyh setej nizkogo davleniya [Reconstruction of low-pressure gas distribution networks in cities]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. No. 1. Available: www.science-education.ru/article/view?id=17748 (accessed August 31, 2020). (rus)

Сведения об авторах

Медведева Оксана Николаевна, докт. техн. наук, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, medvedeva-on@mail.ru

Бессонова Надежда Сергеевна, инженер, ООО НПФ «ЭТНА ПЛЮС», 410040, г. Саратов, ул. Вишневая, 11, bessonova_n@icloud.com

Authors Details

Oksana N. Medvedeva, DSc, A/Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia, medvedeva-on@mail.ru

Nadezhda S. Bessonova, Engineer, ООО “ETNA PLUS”, 11, Vishnevaya Str., 410040, Saratov, Russia, bessonova_n@icloud.com