

УДК 621.31:622.[243+691.4]

Б.Л. Житомирский^{1,2}, e-mail: zhytomirsky@oeg.gazprom.ru¹ ОАО «Газпром оргэнергогаз» (Москва, Россия).² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

К вопросу об оптимизации энергетического баланса термомеханического бурового инструмента при шурфовом диагностировании трубопроводов

В статье проанализированы технические решения и результаты исследований энергетической эффективности термомеханических буровых установок, использующих низкотемпературное термическое и ударное воздействие на грунт. В частности, рассмотрен вопрос об энергоэффективности ручного термомеханического бурового инструмента ударного действия, источником тепловой и электрической энергии которого являлась микротурбина – мобильный газотурбинный агрегат ГТА-18. Дана оценка количества тепловой энергии, передаваемой грунту от теплового потока, влияния волновых процессов и механической энергии, обеспечивающей ударное воздействие на грунт и его вынос на поверхность. В целях повышения эффективности процесса бурения проведен анализ возможности использования части циклового воздуха газотурбинного привода путем его отбора за последней ступенью компрессора и эжекции в канал бурового инструмента для повышения энергии потока при выносе отработанного грунта из шурфа на поверхность. Отмечено, что при этом энергоэффективность газотурбинного привода бурового инструмента существенно снизится. Кроме того, практическая реализация идеи отбора воздуха за компрессором газотурбинного агрегата с последующим сжатием его в эжекторе и подачи с потоком теплоносителя в канал бурового инструмента с использованием оставшейся мощности для обеспечения инструмента тепловой и электрической энергией потребует глубокой переработки газотурбинного двигателя и всего агрегата.

Сделан вывод, что рекомендованные и апробированные на практике показатели энергетического баланса, реализованные в конструкции термомеханического бурового инструмента ударного действия, обеспечивают оптимальное распределение тепловой и механической энергий в процессе управления режимами работы инструмента при работах на газопроводах. В частности, коэффициент полезного действия инструмента при оптимальных параметрах и расчетных режимах работы на 7 % превышает аналогичный показатель, полученный в ходе расчетов с применением методик, основанных на результатах более ранних исследований.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, термомеханический буровой инструмент, газотурбинный агрегат, микротурбина, тепловая энергия, электроэнергия.

.....

B.L. Zhytomirsky^{1,2}, e-mail: zhytomirsky@oeg.gazprom.ru

¹ Gazprom orgenergogaz JSC (Moscow, Russia).² Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education “Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)” (Moscow, Russia).

On the Issue of Optimizing the Energy Balance of a Thermomechanical Drilling Tool for Well Diagnostics of Pipelines

The article analyzes technical solutions and results of studies of the energy efficiency of thermomechanical drilling rigs using low-temperature thermal and impact on the soil. In particular, the issue of energy efficiency of a manual thermomechanical drilling tool was considered, the source of thermal and electric energy of which was a microturbine – a mobile gas turbine unit GTA-18. The estimation of the amount of thermal energy transmitted to the soil from the thermal flux, the influence of wave processes and mechanical energy, providing impact on the soil and its removal to the surface. In order to increase the efficiency of the drilling process, an analysis is made of the possibility of using

part of the cyclic air of a gas turbine drive by selecting it behind the last stage of the compressor and ejecting it into the channel of the drilling tool to increase the energy of the stream when removing the spent soil from the pit to the surface. It was noted that in this case, the energy efficiency of the gas-turbine drive of the drilling tool will decrease significantly. In addition, the practical implementation of the idea of taking air behind the compressor of a gas turbine unit and then compressing it in an ejector and supplying it with a coolant stream to the channel of a drilling tool, using the remaining power to provide the tool with thermal and electric energy, will require deep processing of the gas turbine engine and the entire unit.

It is concluded that the energy balance indicators recommended and tested in practice, implemented for the construction of a thermomechanical drilling tool, provide an optimal distribution of thermal and mechanical energies in the process of controlling the tool operating modes when working on gas pipelines. In particular, the efficiency of the tool with optimal parameters and calculated operating modes is 7 % higher than the similar indicator obtained in the course of calculations using methods based on the results of earlier studies.

Keywords: energy efficiency, thermomechanical drilling tool, gas turbine unit, mini-turbine, thermal energy, electricity.

Термин «энергетическая эффективность» применяется в отношении производственных (технологических) процессов и комплексов технических средств, с помощью которых данные процессы реализуются. Показатели уровня энергетической эффективности, исследованию которых посвящены, в частности, работы [1–4], используются при проектировании для обоснования оптимальности выбора технических средств (технологий) для применения на технологических объектах, а также при разработке мероприятий по повышению энергетической эффективности по результатам энергетических обследований. Опыт АО «Газпром энергетический» в области проведения энергетических обследований производственных объектов дочерних обществ ПАО «Газпром» подтвердил высокую результативность применения данных анализа энергетической эффективности технологических процессов для разработки и последующей реализации энергосберегающих мероприятий.

В данной статье рассмотрены результаты расчета и анализа данных энергетической эффективности установок для комбинированного (низкотемпературного термического и ударного) бурения мерзлых и горных грунтов при шурфовом диагностировании трубопроводов, а также при строительстве и эксплуатации нефтегазопроводов.

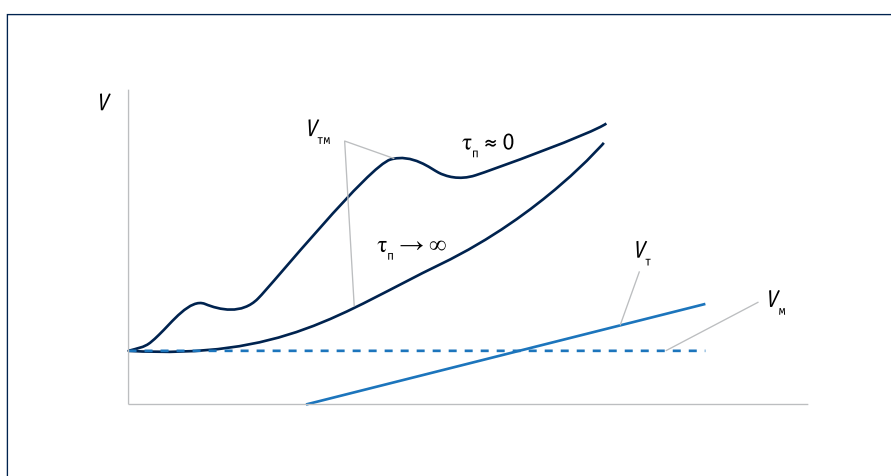


Рис. 1. Зависимость скорости бурения от времени и температуры поверхности грунта: V – скорость бурения, м/с; V_m – скорость механического бурения, м/с; V_t – скорость термического бурения, м/с; V_{tm} – скорость термомеханического бурения, м/с; τ_n – время между термическим и механическим воздействием на грунт, ч

Fig. 1. The dependence of the drilling speed on time and soil surface temperature: V – drilling speed, m/s; V_m – mechanical drilling speed, m/s; V_t – thermal drilling speed, m/s; V_{tm} – thermomechanical drilling speed, m/s; τ_n – time between thermal and mechanical impact on the soil, h

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВОК ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО БУРЕНИЯ

Термомеханический способ бурения – это технологический процесс разрушения грунта, осуществляемый путем подвода тепловой и механической энергии. В результате увеличивается концентрация энергии на разрушаемой поверхности и снижается сопротивляемость разрушению мерзлых грунтов и скальных пород при заданных

режимах их теплового нагружения. Теоретические основы, характеризующие процессы термомеханического воздействия на грунт при шурфовом диагностировании и ремонте трубопроводов, представлены РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина и АО «Газпром энергетический» в [5, 6].

Так, в [5] приведены аргументы эффективной низкотемпературной термомеханической разработки плохо термо-

Ссылка для цитирования (for citation):

Житомирский Б.Л. К вопросу об оптимизации энергетического баланса термомеханического бурового инструмента при шурфовом диагностировании трубопроводов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2020. № 1–2. С. 98–102.

Zhytomirsky B.L. On the Issue of Optimizing the Energy Balance of a Thermomechanical Drilling Tool for Well Diagnostics of Pipelines. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2020;(1–2):98–102. (In Russ.)

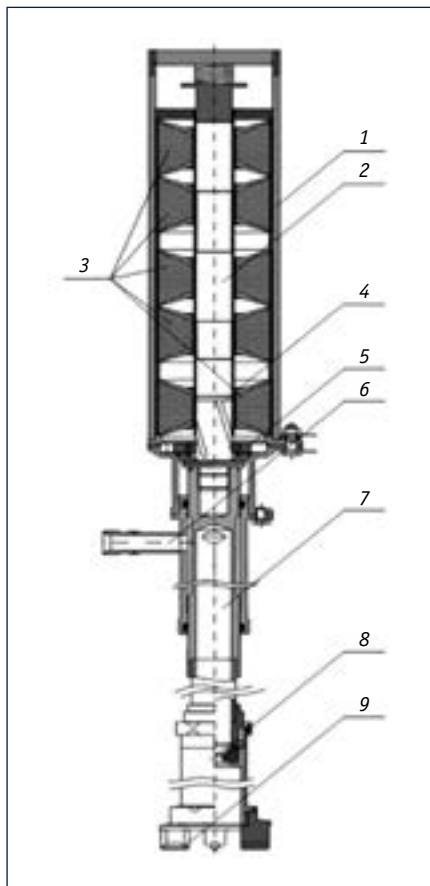


Рис. 2. Схема термомеханического бурового инструмента:

1 – электромагнитный ударный узел; 2 – боек; 3 – электромагнитные катушки; 4 – направляющие шлицы; 5 – ударно-поворотный узел; 6 – металлорукав для подвода теплоносителя; 7 – волновод; 8 – сопло Лавала; 9 – индентор

Fig. 2. Scheme of thermomechanical drilling tool:

1 – electromagnetic shock assembly; 2 – core bullet; 3 – electromagnetic coils; 4 – guide slots; 5 – shock-swiveling assembly; 6 – metal hose for supplying a thermal fluid; 7 – waveguide; 8 – Laval nozzle; 9 – indenter



Рис. 3. Газотурбинный агрегат GTA-18

Fig. 3. Gas turbine unit GTA-18

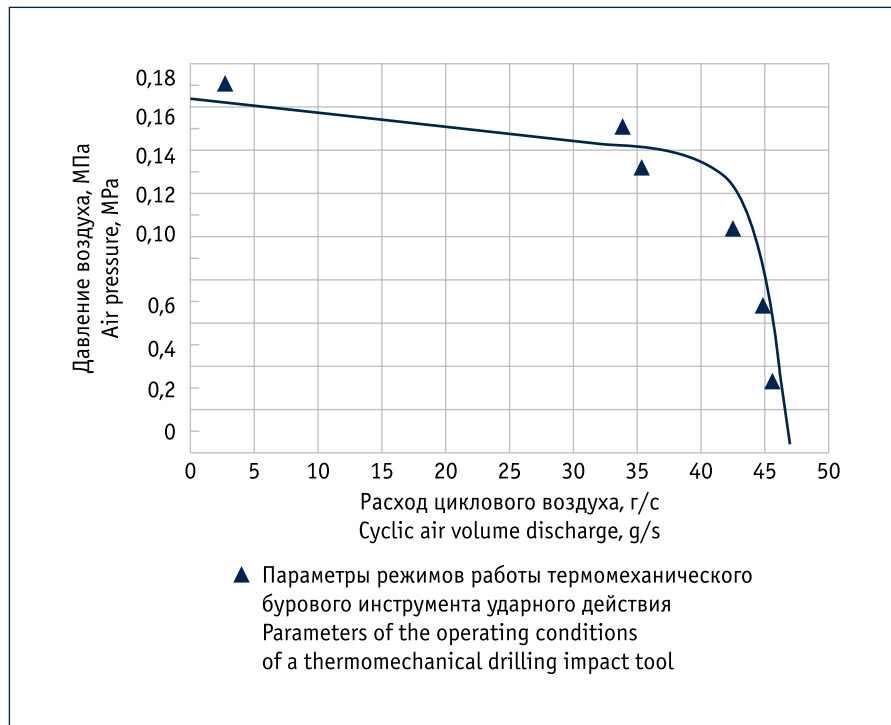


Рис. 4. График зависимости расхода циклового воздуха газотурбинного агрегата от давления газового потока при температуре отбора воздуха $T_{отб} = 220\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 4. The graph of the dependence of the cyclic air flow rate of a gas turbine unit on the gas flow pressure at an air sampling temperature $T_{отб} = 220\text{ }^\circ\text{C}$

буримых и нетермобуримых грунтов. К примеру, скорость термомеханического бурения горных грунтов в 2–2,5 раза (в отдельных случаях в 5 и более раз) превышает скорость их механического бурения.

На рис. 1 представлены зависимости скорости бурения (перфоратором, термобуром, термомеханическим инструментом) от времени и температуры нагрева грунта. Кривая $V_{тм}$ имеет два максимума: первый соответствует нагреву грунта в шурфе до температуры 300–600 К, второй соответствует нагреву грунта в шурфе до 1200 К и более. Эти максимумы в литературе называются низко- и высокотемпературными режимами нагружения грунта соответственно.

Для практической реализации научно обоснованного способа низкотемпературного и механического воздействия на грунт создан ручной термомеханический буровой инструмент ударного действия (ТМИ). Внешний вид экспериментального образца ТМИ и его породоразрушающей насадки представлен на рис. 2.

В качестве источника тепловой и электрической энергии в рамках исследования использовалась микротурбина – мобильный газотурбинный агрегат ГТА-18 (рис. 3), обеспечивающий энерготехнологическую эффективность процесса бурения за счет поддержания энергетического баланса и распределения тепловой и электрической энергии при регулировании режимов работы ТМИ. Агрегат состоит из газотурбинного двигателя (ГТД) мощностью 18 кВт и генератора постоянного тока при напряжении на клеммах генератора 26,5–28,5 В. Частота вращения газовой турбины – $56 \cdot 10^3$ об/мин; расход топлива при 18 кВт – 27, 2 кг/ч (при 8 кВт – 18 кг/ч); расход циклового воздуха при частоте вращения турбины $52 \cdot 10^3$ об/мин – 0,044 кг/с; масса – 75 кг; габариты – 840×400×290 мм. Продукты сгорания от ГТД с давлением 0,16–0,18 МПа при температуре 450–500 К подаются в канал ТМИ, где используются в качестве теплоносителя, осуществляющего низкотемпературное воздействие на грунт. Генератор ГТА-18 обеспечивает электроэнергией

Влияние отбора циклового воздуха за осевым компрессором на эффективность газотурбинного агрегата ГТА-18 (эффективная мощность $N_e = 18$ кВт)
The influence of cyclic air extraction behind an axial compressor on the efficiency of a gas turbine unit GTA-18 (actual output $N_e = 18$ kW)

Отбор воздуха, % Air bleed, %	Расход воздуха на входе в агрегат $G_{вх}$, г/с Unit intake air volume $G_{вх}$, g/s	Отбор воздуха в агрегате $G_{отб}$, г/с Unit air bleed $G_{отб}$, g/s	Эффективная мощность N_e , кВт Actual output N_e , kW	Эффективный коэффициент полезного действия, % Effective efficiency, %
5	44	2,2	17,682	23,52
10	41	4,0	13,452	19,06
15	30	6,1	8,341	14,41
20	24	8,2	3,432	9,73

электромагнитный ударный узел ТМИ. Таким образом реализуется ударно-поворотный способ механического разрушения и вынос грунта из шурфа в процессе бурения непосредственно после термического воздействия на грунт. На рис. 4 представлена напорно-расходная характеристика компрессора ГТА – график зависимости расхода циклового воздуха от давления газового потока при температуре, равной 220 °С.

При изменении расхода циклового воздуха в интервале 30–37 г/с давление воздуха незначительно снижается по линейному закону с 0,16 до 0,14 МПа.

Номинальному расходу, равному 44 г/с, и номинальной эффективной мощности соответствует давление 0,12 МПа. При увеличении расхода давление резко падает до атмосферного. Подобная газодинамическая характеристика осевого компрессора ГТА ограничивает возможности регулирования режимов его работы.

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ

В целях изучения методов повышения энергетической эффективности процесса бурения выполнен анализ возмож-

ности использования части циклового воздуха газотурбинного привода путем его отбора за последней ступенью компрессора и эжекции в канал бурового инструмента для повышения энергии потока при выносе отработанного грунта из шурфа на поверхность. Расчеты показали (табл.), что при таком варианте энергоэффективность газотурбинного привода бурового инструмента существенно снизится. Так, для отбора за компрессором 15 % циклового воздуха необходимо затратить 47 % эффективной мощности ГТА. При этом 53 % оставшейся мощности будет недостаточно для обеспечения

Актуальные задачи противокоррозионной защиты и промышленной безопасности, новейшие технологии и материалы огнезащиты, изоляции, электрохимической защиты, контроль качества покрытий, методы восстановления и усиления строительных конструкций зданий и сооружений, газоходов, трубопроводов и оборудования предприятий нефтегазовой отрасли, энергетики, металлургии и других отраслей.



XI МЕЖОТРАСЛЕВАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА-2020»

25 марта 2020 г., Москва, ГК ИЗМАЙЛОВО

Защита от коррозии

Огнезащита и изоляция

Новейшие ЛКМ

В работе предыдущих конференций «АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА-2010-2019» приняли участие сотни делегатов от компаний различных отраслей: руководители предприятий энергетики, металлургии, цементной, нефтегазовой и химической отраслей промышленности, главные инженеры, главные механики, главные энергетики, начальники подразделений, ответственных за промышленную безопасность, защиту от коррозии, ремонты и капитальное строительство; ведущие специалисты инженеринговых и проектных организаций, занимающихся противокоррозионной защитой; руководители, технологи и эксперты компаний-производителей красок и лакокрасочных материалов, приборов электрохимической защиты, различных решений для защиты от коррозии, огнезащиты, изоляции, усиления и восстановления зданий и оборудования.

тел.: +7 (905) 567-8767, эл. почта: admin@intecheco.ru, сайт: www.intecheco.ru

бурового инструмента тепловой и электрической энергией.

Таким образом, идея отбора воздуха за компрессором ГТА с последующим сжатием его в эжекторе и подачи с потоком теплоносителя в канал бурового инструмента с использованием оставшейся мощности ГТА для обеспечения инструмента тепловой и электрической энергией при всей привлекательности идеи потребует глубокой переработки газотурбинного двигателя и всего ГТА. Конструкторские разработки займут не менее года, а изготовление опытного образца, его испытания и доводочные работы – еще около двух лет.

В целях оптимизации энергетического баланса при распределении тепловой и механической энергии в серийном ГТА-18 и с учетом опыта энергетических обследований дочерних обществ ПАО «Газпром» были проведены фундаментальные исследования рабочих процессов ударного термомеханического бурения шурфов на газопроводах. На первом этапе была разработана и решена математическая модель про-

цесса термомеханического воздействия на грунт теплового потока [5, 6], в основу которой были положены классические законы и уравнения механики сплошных сред. Далее была разработана методология определения количества тепла, передаваемого в результате теплообмена и с учетом массопереноса (плотность теплового потока) для выноса как капиллярной, так и «плечной» влаги. Дана научно аргументированная оценка количества тепловой энергии, передаваемой грунту от теплового потока, влияния волновых процессов и механической энергии, обеспечивающей ударное воздействие на грунт и его вынос на поверхность. В ходе исследования, в частности, было установлено, что при расходе воздуха $G_b = 0,04$ кг/с и его давлении 0,135 МПа в каждую секунду рабочей среде передается механическая энергия в количестве 2626 Дж/с·м² и тепловая энергия в количестве 9189 Дж/с·м², в том числе на нагрев и осушку расходуется 2480 Дж/с·м² (27 %), а 6709 Дж/с·м² поступает в забой.

За промежуток времени между двумя ударами в забой поступит 270,8 Дж/с·м² тепловой энергии.

При этом коэффициент полезного действия термомеханического бурового инструмента при оптимальных параметрах и расчетных режимах работы составляет 28 %, что на 7 % выше, чем при расчетах с применением методик, основанных на результатах более ранних исследований.

ВЫВОДЫ

С учетом опыта энергетических обследований дочерних обществ ПАО «Газпром» проведены фундаментальные исследования рабочих процессов ударного термомеханического бурения шурфов на газопроводах.

Рекомендованные и апробированные на практике показатели энергетического баланса реализованы в конструкции ТМИ и обеспечивают оптимальное распределение тепловой и механической энергии в процессе управления режимами работы инструмента при работах на газопроводах.

Литература:

1. Гоголюк В.В., Житомирский Б.Л., Трегубов А.И., Стулова И.В. Система энергетических обследований дочерних обществ и организаций ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2013. № 5 (688). С. 78–81.
2. Хворов Г.А., Юмашев М.В., Кузнецов О.А., Житомирский Б.Л. Методология проведения энергетических обследований технологических объектов // Газовая промышленность. 2009. № 5 (631). С. 68–72.
3. Топилин А.В., Житомирский Б.Л., Ляпичев Д.М. и др. Методы оценки технологического уровня объектов магистрального транспорта газа // Газовая промышленность. 2015. № 12 (731). С. 45–49.
4. Ляпичев Д.М., Житомирский Б.Л. Современные подходы к организации мониторинга напряженно-деформированного состояния технологических трубопроводов компрессорных станций // Газовая промышленность. 2016. № 11 (745). С. 46–53.
5. Житомирский Б.Л. Исследование термодинамики тепло- и массообмена среды в грунтах при термомеханическом способе бурения шурфов на магистральных газопроводах // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2019. № 2 (110). С. 38–43.
6. Житомирский Б.Л., Дубинский В.Г., Лопатин А.С. Исследование режимов течения струи воздуха от бурового инструмента при термомеханическом способе разработки шурфов на газопроводах // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2019. № 4 (297). С. 99–111.

References:

1. Gogolyuk V.V., Zhitomirsky B.L., Tregubov A.I., Stulova I.V. The System of Energy Surveyings of Subsidiaries and Organizations of Gazprom JSC. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry]. 2013;5(688):78–81. (In Russ.)
2. Khvorov G.A., Yumashev M.V., Kuznetsov O.A., Zhitomirsky B.L. Methodology for Conducting Energy Surveys of Technological Objects. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry]. 2009;5(631):68–72. (In Russ.)
3. Topilin A.V., Zhitomirsky B.L., Lyapichev D.M. et al. Methods for Assessing the Technological Level of Gas Transmission Facilities. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry]. 2015;12(731):45–49. (In Russ.)
4. Lyapichev D.M., Zhitomirsky B.L. Modern Approaches to the Organization of Monitoring of Stress Strain Behavior of Process Pipelines and Compressor Plants. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas Industry]. 2016;11(745):46–53. (In Russ.)
5. Zhitomirsky B.L. The Study of Heat- and Mass-Transfer Thermodynamics of the Medium in Soils During Application of Thermomechanical Method of Drilling Duplets on Main Gas Pipelines. *Oborudovaniye i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and Technologies for Oil and Gas Industry]. 2019;2(110):38–43. (In Russ.)
6. Zhitomirsky B.L., Dubinskiy V.G., Lopatin A.S. Investigation of Flow Regimes of Air Jet from Drilling Tool Using Thermomechanical Method of Development of Pits in Gas Pipelines. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza im. I.M. Gubkina* [Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas]. 2019;4(297):99–111. (In Russ.)