



УДК 550.622:658.382.3

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ
ТЕПЛОТЫ В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСНЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ НА
ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТАХ**

**THE MAIN DIRECTIONS OF MODELLING OF SYSTEMS OF UTILIZATION OF
WARMTH AS A PART OF COMPLEX POWER SOURCES AT GEOLOGICAL AND
PROSPECTING WORKS**

**Г.В. Черезов, С.В. Головин
G.V. Cherezov, S.V. Golovin**

*Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ), Россия,
117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23*

*Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI-RGGRU), 23 Miklukho-Maklaya St, Moscow,
117997, Russia*

E-mail: office@mgri-rggru.ru

Аннотация. Проведён анализ группы производственных энергопотребителей – буровых установок разведочного бурения, в труднодоступных и удаленных от промышленных центров и их энергетических систем районах. Выделено одно из основных направлений экономии топливно-энергетических ресурсов в собственных энергосистемах – использование утилизированной теплоты дизельных электростанций. Рассмотрено моделирование систем утилизации теплоты на основе теоретических зависимостей и приведен пример моделирования на основе эмпирических закономерностей, полученных экспериментально. Обобщены результаты, даны рекомендации по использованию моделирования при проектировании, прогнозировании и поиске наилучших решений теоретических и прикладных задач с учетом особенностей этих методов.

Resumé. The analysis of group of production power consumers – drilling rigs of prospecting drilling, in areas, remote from industrial centers and their power systems, is carried out. One of the main directions of economy of fuel and energy resources in own power supply systems – use of the utilized warmth of diesel power plants - is allocated. Modeling of systems of utilization of warmth on the basis of theoretical dependences is considered and the example of modeling on the basis of the empirical regularities received experimentally is given. Results are summarized, recommendations about use of modeling at design, forecasting and search of the best solutions of theoretical and applied tasks taking into account features of these methods are made.

Ключевые слова: автономное энергоснабжение, энергосбережение, утилизация теплоты, теплоутилизационная установка, моделирование теплоутилизационных систем.

Key words: autonomous power supply, energy saving, warmth utilization, heat recovery installation, modeling of heat recovery systems.

Геолого-разведочные работы (ГРР) в большинстве случаев проводятся в местах труднодоступных и удаленных от промышленных центров и их энергетических систем. Это предопределяет необходимость создания собственных энергосистем на основе котельных установок и дизельных электростанций с широкой сетью электро- и теплокоммуникаций. Работа собственных энергосистем отличается низкой эффективностью, одной из причин которой является высокая стоимость топлива на месте работ с учетом его доставки. В геолого-разведочных предприятиях Северо-Востока, например, затраты на энергоснабжение ГРР могут достигать 50–60% от общей стоимости проводимых работ [Меркулов, 2008]. Очевидно, что в таких условиях экономия топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) существенно повысит эффективность ГРР.

Одним из основных направлений экономии ТЭР в собственных энергосистемах является использование утилизированной теплоты дизельных электростанций (ДЭС) и использование ее для отопления отдельных потребителей или в тепловых сетях



котельной установки. Установки утилизации теплоты для передвижных и стационарных ДЭС были разработаны в МГРИ-РГГРУ и прошли производственные испытания. Опыт эксплуатации таких установок показывает, что общий КПД дизель-агрегата за счет использования утилизированной теплоты может увеличиться вдвое, а экономия достигает 10–20 кг у.т. в час на одну установку [Меркулов, 2008].

Основную проблему при разработке систем утилизации теплоты ДЭС представляет проектирование теплообменника для передачи теплоты от выхлопных газов двигателя ДЭС к вторичному теплоносителю (воздуху или воде) и расчет параметров его работы в различных режимах.

Существенно упростить задачу возможно на основе математического моделирования протекающих процессов [Меркулов, Косьянов, 2008]. Исследование математической модели позволит избежать грубых ошибок при разработке конструкции теплообменника и получить характеристики его работы в различных режимах.

Моделирование систем утилизации теплоты ДЭС возможно по двум основным направлениям:

- на основе теоретических зависимостей (детерминированные модели);
- на основе эмпирических закономерностей, полученных экспериментально (стохастические модели) [Меркулов, Косьянов, 2010].

Разработка детерминированной модели системы утилизации теплоты основано на теоретических предпосылках теории теплообмена.

Режим работы установки утилизации теплоты определяется тремя основными уравнениями: уравнением теплопередачи (1), уравнениями теплового баланса первичного (2) и вторичного (3) теплоносителей:

$$Q = KF \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}}, \quad (1)$$

$$Q = W_1(T_1 - T_2), \quad (2)$$

$$Q = W_2(t_2 - t_1), \quad (3)$$

где Q – тепловой поток, утилизируемый установкой, кВт; K – коэффициент теплопередачи, кВт/(м²·°С); F – площадь теплообмена, м²; T_1 , T_2 – температура первичного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника, °С; t_1 , t_2 – температура вторичного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника, °С; W_1 , W_2 – водяные эквиваленты первичного и вторичного теплоносителей, кВт/°С, $W = Mc$, где M – массовый расход (кг/с) и c – теплоемкость теплоносителя (кДж/кг·°С).

Решив совместно уравнения (1)–(3) и заменив на коэффициент m отношение

$$m = \frac{1 - \exp\left(KF \frac{W_2 - W_1}{W_2 \cdot W_1}\right)}{\frac{W_1}{W_2} - \exp\left(KF \frac{W_2 - W_1}{W_2 \cdot W_1}\right)}, \quad (4)$$

получим уравнение, характеризующее тепловой режим установки утилизации теплоты:

$$Q = mW_1(T_1 - t_1). \quad (5)$$

Коэффициент m характеризует теплотехнические условия работы теплообменника.

Водяной эквивалент первичного теплоносителя определяется как произведение расхода выхлопных газов (M_1) на их теплоемкость (c_1): $W_1 = M_1 c_1$. Теплоемкость выхлопных газов близка к 1 и величина водяного эквивалента может быть выражена через основные параметры дизель-генератора, его мощность и расход топлива.

$$W_1 = \frac{(G + M_B)}{3600}, \quad (6)$$

где G – расход топлива, кг/ч; M_B – расход воздуха дизель-агрегатом, кг/ч.

Для четырехтактных дизелей $M_B = 30 \cdot V \cdot n$, где V – рабочий объем дизеля, м³, n – число оборотов двигателя, 1/м.



Расход топлива G дизель-генератором при различной нагрузке может быть рассчитан по формуле:

$$G = G_H \left[b + (1 - b) \frac{P}{P_H} \right], \text{ кг/ч,} \quad (7)$$

где b – доля расхода топлива на холостом ходу от расхода при номинальной нагрузке, для дизельных электростанций эта величина составляет $0.25 \div 0.3$; P – нагрузка генератора, кВт; P_H – номинальная мощность дизель-генератора, кВт; G_H – расход топлива при номинальной мощности, кг/ч.

Температура выхлопных газов на выходе дизель-генератора дизельных электростанций может быть определена по следующей зависимости:

$$T_1 = \left(0,23 + 0,77 \frac{P}{P_H} \right) T_H, \quad (8)$$

где T_H – температура выхлопных газов при номинальной мощности, кВт.

После подстановки зависимостей (6), (7) и (8) в формулу (5), получим:

$$Q = m \cdot \frac{\left(G_H \cdot \left[b + (1 - b) \frac{P}{P_H} \right] + 30 \cdot V \cdot n \right) \left[\left(0,23 + 0,77 \frac{P}{P_H} \right) T_H - t_1 \right]}{3600}, \text{ кВт.} \quad (9)$$

Полученная математическая модель (9) выражает зависимость величины утилизированного теплового потока от теплотехнических параметров теплообменника, режима работы дизель-генератора и физических свойств теплоносителя [Меркулов, 2008]. Использование модели позволяет еще на стадии проектирования определить тепловую мощность системы утилизации теплоты для широкого диапазона дизель-агрегатов при различной нагрузке генератора дизельной электростанции.

Теоретические модели позволяют лучше осознать процессы и явления, которые они воспроизводят, их изучение позволят устанавливать новые фундаментальные зависимости. Однако, они не лишены некоторой доли субъективизма, возникающей при математическом описании реальных процессов, не учитывают, а иногда осознано игнорируют некоторые факторы, не существенные по мнению разработчика модели [Меркулов, Косьянов, 2010].

Одним из недостатков теоретических моделей заключается в том, что далеко не всегда удается учесть влияние периодических и случайных факторов, т. е. низкая продуктивность модели. В этом случае более высокую адекватность дает второе направление моделирования, связанное с разработкой стохастических моделей на основе результатов экспериментальных исследований.

Проведение экспериментальных исследований, особенно в производственных условиях, не всегда дает результаты приемлемой точности, возможность воспроизведения замеров при заданной совокупности факторов [Косьянов, Меркулов, 2011]. Поэтому, для разработки стохастической модели нами была использована опытно-экспериментальная установка утилизации теплоты передвижных ДЭС в лаборатории теплотехники на Сергиево-Посадском учебно-научно-производственном полигоне МГРИ-РГГРУ. В 2014–2015 годах был проведен ряд экспериментальных исследований с использованием в качестве вторичного теплоносителя воздуха. Планирование эксперимента и применение современных измерительных приборов позволило получить достаточно репрезентативную базу данных, замеренных с высокой точностью.

Корреляционный анализ позволил выделить основные факторы влияющие на величину теплового потока теплоутилизационной установки – расход теплоносителя (M , кг/с) и нагрузка генератора ДЭС (P , кВт). В качестве уравнения регрессии принято уравнение вида

$$Q = a + b \cdot \ln M, \text{ кВт,} \quad (10)$$

где a и b коэффициенты уравнения регрессии, зависящие от величины нагрузки ДЭС.

В результате регрессионного анализа были установлены следующие зависимости для коэффициентов:



$$a = 46,69 + 0,57 \cdot P, \quad (11)$$

$$b = 21,22 + 0,259 \cdot P. \quad (12)$$

После подстановки значений коэффициентов (11) и (12) в уравнение (10) получим следующее выражение

$$Q = (46,69 + 0,57 \cdot P) + (21,22 + 0,259 \cdot P) \cdot \ln M, \text{ кВт.} \quad (13)$$

Регрессионный и корреляционный анализ результатов экспериментальных исследований дают возможность утверждать, что представленная зависимость является достаточно точной, адекватной и значимой, следовательно, она может выступать в качестве модели при проектировании и прогнозировании параметров работы теплоутилизационной установки. Следует подчеркнуть тот факт, что приемлемые результаты с использованием модели (13) можно получить только для условий, не выходящих за пределы условий проведения эксперимента, а именно:

- дизель-агрегат ДЭС-60 с генератором мощностью 60 кВт;
- нагрузка дизель-агрегата изменялась в пределах 0–60 кВт;
- в качестве вторичного теплоносителя использовался воздух;
- расход воздуха изменялся в интервале 0.1–1.2 кг/с, и ряд других ограничений.

Обобщая, можно отметить что, как теоретическое, так и экспериментальное моделирование необходимо широко использовать при проектировании, прогнозировании и поиске наилучших решений теоретических и прикладных задач с учетом особенностей этих методов. Теоретические модели более фундаментальны, позволяют изучать теоретические предпосылки реальных процессов, при этом они, как правило, сложны, громоздки и не всегда приемлемы для решения прикладных инженерных задач. Эмпирические зависимости практически не отражают теорию процесса, плохо поддаются логическому осмыслению, т. е. более формальны. При этом они в большей степени подходят для решения прикладных задач, способны обеспечить хорошую воспроизводимость реальных данных, но на некотором множестве, ограниченном условиями эксперимента, по данным которого они разрабатывались.

Список литературы

References

1. Косьянов В.А., Меркулов М.В., 2011. Технический критерий оптимизации при выборе систем энергоснабжения геологоразведочных работ. Горный информационно-аналитический бюллетень, (4):

Kosyanov V.A. Merkulov M.V., 2011. Technical criterion of optimization at the choice of systems of power supply of prospecting works. Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin], (4): 352–354. (in Russian)

2. Меркулов М.В. 2008. Оптимизация энергетических комплексов при бурении геологоразведочных скважин в условиях Крайнего Севера. Дис. ... докт. тех. наук. М., 229.

Merkulov M.V. 2008. Optimizatsiya energeticheskikh kompleksov pri burenii geologorazvedochnyh skvazhin v usloviyah Krainego Severa [Optimization of power complexes when drilling prospecting wells in the conditions of Far North]. Dis. ... doct. tech. sciences. M, 229. (in Russian)

3. Меркулов М.В., Косьянов В.А. 2008. Обоснование оптимального варианта энергоснабжения на основе технико-экономического моделирования. Горный информационно-аналитический бюллетень, (8). Деп. №644/08-08 от 28.04.08.

Merkulov M.V., Kosyanov V.A. 2008. Justification of an optimal variant of power supply on the basis of technical and economic modeling. Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin], (8). Depp. №644/08-08 of 28.04.08. (in Russian)

4. Меркулов М.В., Косьянов В.А. 2010. Оптимизация технических решений на основе технико-математического моделирования. В мире научных открытий, (2): 26–27.

Merkulov M.V., Kosyanov V.A. 2010. Optimization of technical solutions on the basis of technical and mathematical modeling. V mire nauchnykh otkrytij, (2): 26–27. (in Russian)