

УДК 620.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН РАСХОДОВ ЖИДКОСТИ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Жаров А.В., Павлов А.А., Лебедев А.Е., Ломов А.А.

*ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет»,
Ярославль, e-mail: pavlova@list.ru*

Когенерационные установки, снабжающие транспортное средство тепловой и электрической энергией во время длительных стоянок, имеют общую гидравлическую систему с его двигателем внутреннего сгорания. Передача транспортному средству тепловой энергии, которая вырабатывается когенерационной установкой, осуществляется по средствам движения теплоносителя (представляющего собой охлаждающую жидкость, применяемую в двигателе внутреннего сгорания) в их общей гидравлической системе. Для эффективной работы когенерационной установки необходимо обеспечить соответствующий уровень расхода жидкости в элементах гидравлической системы. Определить расход жидкости в элементах гидравлической системы на стадии проектных работ можно только при помощи гидродинамического моделирования. В связи с этим целью работы является гидродинамическое моделирование параметров течения жидкости в элементах проектируемой когенерационной установки. Для гидродинамического моделирования используется метод исследования величин потокораспределения жидкости, базирующийся на теории сложных разветвленных цепей. При применении выбранного метода исследования разработана гидравлическая цепь проектируемой когенерационной установки, составлена для неё система нелинейных алгебраических уравнений, определены коэффициенты гидравлического сопротивления её участков. В результате рассчитаны расходы жидкости по всем участкам гидравлической цепи проектируемой когенерационной установки.

Ключевые слова: когенерационная установка, гидравлическая схема, гидродинамическое моделирование

DETERMINATION OF EXPENSES OF THE LIQUID IN HYDRAULIC ELEMENTS OF COGENERATION UNIT OF THE VEHICLES

Zharov A.V., Pavlov A.A., Lebedev A.E., Lomov A.A.

FGBOU VPO «The Yaroslavl state technical university», Yaroslavl, e-mail: pavlova@list.ru

Cogeneration plants, which supply the vehicle with heat and electric energy during the long stoppage, have a common hydraulic system with an internal combustion engine. Heat energy which is generated by the installation of cogeneration plant, transfers to the vehicle due to the movement of the heat in their common hydraulic system (heat movement is a coolant which is used in internal-combustion engine). For the effective work of the cogeneration plant it is necessary to ensure an appropriate level of consumption of the liquid in the hydraulic system. To define the flow of the liquid in the hydraulic system at the stage of design work it is necessary to start hydraulic simulation. In accordance with above mentioned the purpose of the project is the hydrodynamic simulation of fluid flow parameters in cogeneration installation. Method of investigation of flux-distribution liquid parameters which is based on the theory of complex branched chains is suitable for simulation. Due to selected method hydraulic circuit of cogeneration plant is developed, the system of nonlinear algebraic equations is prepared and hydraulic resistance coefficients of circle parts are defined. As a result the consumption on all parts of a hydraulic fluid circuit of cogeneration plants is calculated.

Keywords: cogeneration plants, the hydraulic scheme, hydrodynamic modeling

Когенерационные установки (КГУ) с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) находят (в современных реалиях ускоренного внедрения энергосберегающих технологий) все более широкое применение в таких областях деятельности человека, как:

- жилищно-коммунальное хозяйство;
- автономное снабжение тепловой и электрической энергией промышленных предприятий и гражданских объектов.

Причиной активного внедрения в вышеупомянутых областях КГУ является их высокая эффективность (общий коэффициент полезного действия составляет до 90%), полная автономность, а также возможность гибкого управления агрегатами в зависимости от уровня потребления тепловой и электрической энергии. Как правило, в вышеупомянутых сферах применяются

КГУ с газопоршневыми ДВС мощностью от 300 до 1000 кВт в одном агрегате. Однако следует заметить, что в работе [2] было предложено использовать КГУ (в замен жидкостных подогревателей, выпускаемых преимущественно фирмами «Webasto» и «Eberspacher») в качестве автономных источников тепловой и электрической энергии на наземных транспортных средствах (ТС), таких, как:

- большегрузные автомобили;
- автобусы;
- железнодорожный транспорт;
- строительно-дорожная и сельскохозяйственная техника.

Основным предназначением КГУ на ТС является снабжение во время их длительных стоянок в условиях низких отрицательных температур тепловой и электрической энер-

гий. Здесь мощности применяемых когенерационных установок согласно расчетным данным находятся в диапазоне 10...70 кВт, а в качестве ДВС используется дизельный двигатель. Передача ТС тепловой энергии, которая вырабатывается когенерационной установкой, осуществляется посредством движения теплоносителя (представляющего собой охлаждающую жидкость, применяемую в ДВС) в их общей гидравлической системе.

Общая гидравлическая система объединяет посредством трубопроводов элементы системы охлаждения ДВС транспортного средства и теплогенерирующих устройств КГУ, к которым относится её ДВС и теплообменник утилизатор теплоты отработавших газов. Причем схема соединения трубопроводами всех элементов КГУ и системы охлаждения ДВС транспортного средства комбинированная – в равной степени при-

сутствуют соединения по последовательной и параллельной гидравлической схеме. Известно, что в комбинированных гидравлических системах расход теплоносителя по её элементам устанавливается в зависимости от величины их гидравлических сопротивлений. Кроме этого, необходимо определить и величины гидравлических сопротивлений соединительных трубопроводов для обеспечения необходимых величин расходов теплоносителя в них. Единственным способом определения величины расходов теплоносителя в элементах КГУ и величин их гидравлического сопротивления на этапе выполнения проектных работ является гидродинамическое моделирование. В связи с этим целью работы является гидродинамическое моделирование параметров течения жидкости в элементах проектируемой КГУ (схема КГУ приведена на рис. 1).

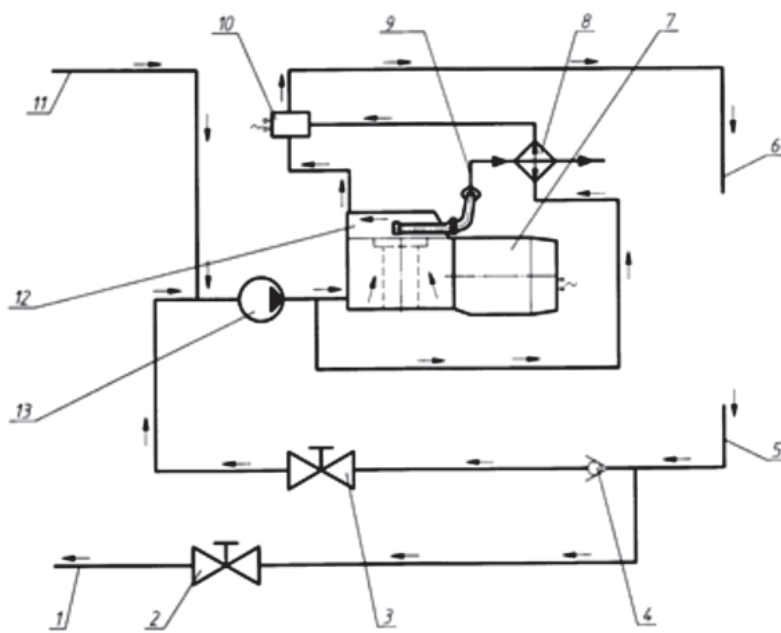


Рис. 1. Схема общей гидравлической системы КГУ:

1, 11 – гидравлические линии, соединяющие ДВС транспортного средства и КГУ; 5, 6 – гидравлические линии радиатора отопителя ТС; 2, 3 – краны управления; 4 – клапан обратный; 7 – электрогенератор; 8 – теплообменник утилизатор теплоты отработавших газов; 9 – трубопровод отработавших газов; 10 – бак смеситель-нагреватель; 12 – ДВС КГУ; 13 – циркуляционный насос

В настоящее время можно применить два кардинально отличающихся между собой подхода к гидродинамическому моделированию. Первый подход – это использование методов компьютерной гидрогазодинамики (CFD технологии). Второй способ – использование методов исследования величин потокораспределения жидкости, базирующийся на теории сложных разветвленных цепей. Достоинством первого способа является его высокая информативность – на-

ряду с величинами распределения потоков жидкости в элементах гидравлической схемы определяются и её локальные параметры течения внутри трубопроводов. Но здесь необходимо отметить, что основным сдерживающим фактором применения вышеупомянутого метода (сводящего его применение на нет в нашем случае) является необходимость разработки 3D модели гидравлической системы всей КГУ, включая помимо собственных устройств и элементы

системы охлаждения ДВС транспортного средства. Напротив, применение второго вышеупомянутого способа позволит определить величины потоков теплоносителя во всех устройствах гидравлической системы (в соответствии с величиной их гидравлических сопротивлений), имея только её разработанную гидравлическую схему. По этой причине в качестве основного инструмента применим второй способ гидродинамического моделирования.

Сущность метода исследования величин потокораспределения жидкости, базирующегося на теории сложных разветвленных цепей, заключается в следующем. Гидравлическая система проектируемой КГУ представляется в виде гидравлической цепи. Гидравлическая цепь – это модель гидравлической системы, в которой места соединения и деления потоков жидкости заменены узловыми точками, а участки её течения – ветвями, т.е. отрезками, соединяющими узловые точки. В цепочке последовательно расположенных элементов (в этом случае представляем любой элемент теплоэнергетической установки, входящий в её гидравлическую систему отрезком цепи) любого замкнутого контура гидравлической системы выход из каждого предыдущего элемента является входом в последующий. Математический расчет гидравлической цепи сводится к определению расходов для всех составляющих её p участков и m давлений в принадлежащей ей узлах.

В основе расчета гидравлической цепи лежит применение для неё первого и второго законов Кирхгофа [3, 6].

Согласно первому закону Кирхгофа распределение жидкости по участкам гидрав-

лической цепи подчиняется балансу расхода в каждом узле:

$$\sum_{i=1}^{i=p} X_i = 0, \quad (1)$$

где X_i – расход в i -м участке цепи, кг/с.

Согласно второму закону Кирхгофа для каждого замкнутого контура гидравлической цепи должен выполняться закон баланса потерь давлений. Перепад давления для замкнутого контура гидравлической цепи определяется по формуле:

$$\sum_{i=1}^{i=k} \Delta P_{0_i} = \sum_{i=1}^{i=k} S_i \cdot X_i^2 = 0, \quad (2)$$

где ΔP_{0_i} – перепад статического давления на участке цепи, входящем в исследуемое кольцо, кПа; S_i – коэффициент гидравлического сопротивления участка, $\text{кПа} \cdot \text{с}^2 / \text{кг}^2$; k – число замкнутых контуров гидравлической цепи.

Таким образом, для нахождения неизвестных величин расходов в участках гидравлической цепи необходимо решить m уравнений (1.1) и $k = p - (m - 1)$ уравнений (2). В результате для гидравлической цепи нужно решить систему из $(k + m)$ нелинейных алгебраических уравнений.

На рис. 2 показана разработанная гидравлическая цепь проектируемой КГУ, когда она, работая, обеспечивает прогрев ДВС транспортного средства и его кабины (номинальный режим). На гидравлической цепи обозначены номера узлов (1, 2, 3...11) и участков ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_{13}$), а также предполагаемые направления течения жидкости.

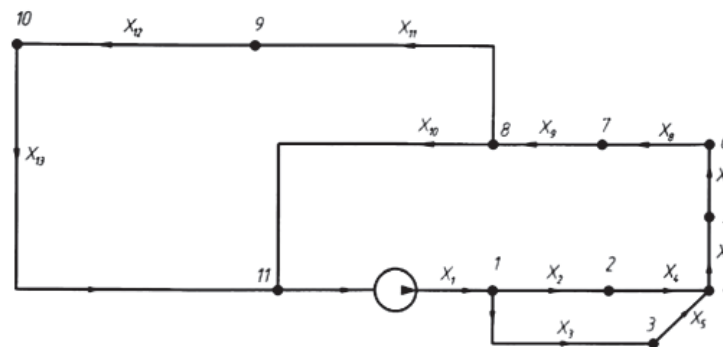


Рис. 2. Гидравлическая цепь КГУ:

X_1 – циркуляционный насос КГУ; X_2 – подвод к ДВС КГУ; X_3 – подвод к рециркуляционному теплообменнику утилизатору; X_4 – система охлаждения ДВС КГУ; X_5 – рециркуляционный теплообменник утилизатор; X_6 – бак смеситель-нагреватель с подводом к радиатору отопителя ТС; X_7 – радиатор отопителя ТС; X_8 – подвод к крану управления участка гидравлической цепи КГУ; X_9 – кран управления участка гидравлической цепи КГУ; X_{10} – подвод к циркуляционному насосу когенерационной установки; X_{11} – подвод к крану управления участка гидравлической цепи ДВС ТС; X_{12} – кран управления участка гидравлической цепи ДВС ТС; X_{13} – ДВС транспортного средства с участком подвода к циркуляционному насосу КГУ

Для нахождения расходов жидкости по участкам гидравлической цепи необходимо составить систему алгебраических уравнений, в основе которых лежат формулы (1) и (2). Методику составления системы алгебраических уравнений покажем на нижеприведенном примере.

Составим уравнения балансов расхода, например, для узла № 4 (обозначения согласно рис. 2):

$$X_4 + X_5 - X_6 = 0.$$

Вышерассмотренным способом для каждого узла гидравлической цепи составляется уравнение балансов расхода.

Для замкнутых контуров ограниченных, например, узлами с номерами 2, 3, 4, 5 запишем уравнения баланса потерь давления.

$$S_2 \cdot X_2^2 + S_4 \cdot X_4^2 - S_3 \cdot X_3^2 - S_5 X_5^2 = 0,$$

где $S_{2,3,4,5}$ – коэффициент гидравлического сопротивления соответствующего участка.

Для получившейся системы алгебраических уравнений применим итерационный метод их решения при помощи электронно-вычислительной машины, а именно метод последовательной минимизации [1, 5].

Для решения системы нелинейных алгебраических уравнений, в основе которых лежат формулы (1) и (2), необходимо задать начальные значения расходов в участках гидравлической цепи $-X_1, X_2, X_3 \dots X_k$ и коэффициенты гидравлического сопротивления $-S$.

Начальные значения расходов задаются так, чтобы удовлетворялись условия уравнений балансов расходов в узлах.

Коэффициенты гидравлического сопротивления S соединительных трубопроводов КГУ определяются согласно [4]. Для таких

элементов КГУ как ДВС, теплообменник, утилизатор теплоты отработавших газов, бак смеситель-нагреватель, а также ДВС транспортного средства и его радиатора отопителя определяются при помощи экспериментальной установки, схема которой приведена на рис. 3.

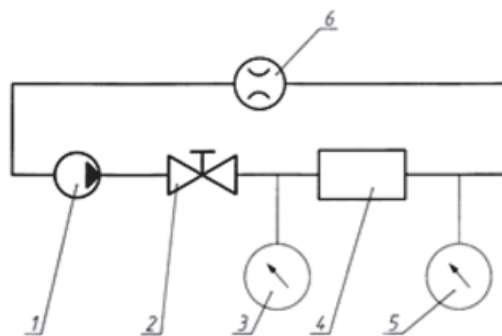


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:
1 – насос; 2 – кран; 3, 5 – манометры;
4 – исследуемый объект; 6 – расходомер

Методика определения коэффициентов гидравлического сопротивления при помощи установки, схема которой представлена на рис. 3, заключается в следующем. Прокачивая охлаждающую жидкость насосом 1 через исследуемый объект 4, измеряем перепад статического давления (на основании показаний манометров 3 и 5) между входом и выходом из него. При этом расходомером 6 постоянно контролируется расход охлаждаемой жидкости через исследуемый объект. Кран 2 предназначен для установки необходимого уровня расхода жидкости через исследуемый объект, а именно от 0 до 0,3 кг/с. В результате получен ряд зависимостей вида $\Delta P_0 = f(X)$, представленных на рис. 4.

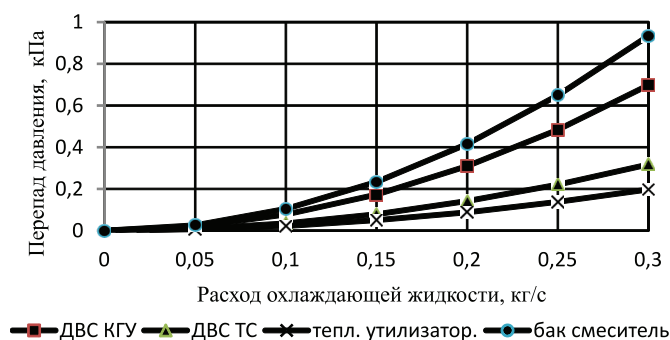


Рис. 4. Результаты исследования гидравлических сопротивлений

Анализируя характер кривых (рис. 4), полученных при экспериментальных исследованиях, установлено, что все зависимости имеют вид $\Delta P_0 = S \cdot X^2$. Проводя статистическую обработку полученных данных, определяем S . После определения S переходим к решению нелинейных алге-

браических уравнений, в результате чего определим расходы жидкости в участках гидравлической цепи. В таблице приведены расчетные данные расходов жидкости в участках гидравлической цепи и определенные согласно [4] и вышеизложенной методике $-S$.

Результаты определения коэффициентов гидравлического сопротивления и расчета расхода жидкости в участках гидродинамической цепи КГУ

Участок	S , кПа с ² /кг ²	X , кг/с (л/мин)	Участок	S , кПа с ² /кг ²	X , кг/с (л/мин)
X_1	0,0	0,28 (16,8)	X_7	8,10	0,28 (16,8)
X_2	6,78	0,12 (7,40)	X_8	0,68	0,28 (16,8)
X_3	6,78	0,16 (9,41)	X_9	0,68	0,28 (16,8)
X_4	7,74	0,12 (7,40)	X_{10}	14,40	0,10 (6,18)
X_5	2,20	0,16 (9,41)	X_{11}	0,68	0,18 (10,62)
X_6	10,38	0,28 (16,8)	X_{12}	0,68	0,18 (10,62)
–	–	–	X_{13}	3,53	0,18 (10,62)

В результате выполнения работы разработана гидравлическая цепь проектируемой КГУ, составлена для неё система нелинейных алгебраических уравнений, определены коэффициенты гидравлического сопротивления её участков. Рассчитаны расходы жидкости по всем участкам гидравлической цепи проектируемой КГУ.

Список литературы

1. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений: пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 280 с.
2. Теплоэнергетическая установка: патент России № 2421626, 20.06.2011. / Жаров А.В., Павлов А.А., Лебедев А.Е. – Бюл. №17.
3. Жидкостное охлаждение автомобильных двигателей / под. ред. А.Л. Новенникова. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
5. Фиакко А., Мак-Кормик Дж. Нелинейное программирование: Методы последовательной безусловной минимизации. – М.: Мир, 1972.
6. Хасилев В. Я. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей. – М.: Энергия, 1978. – 175 с.

References

1. Forsythe J., Malkolm M., Mouler K. *Machine Methods of Mathematical Calculations*. Moscow: World, 1980. 280 p.
2. Zharov A.V., Pavlov A.A., Lebedev A.E. *Teploenergeticheskaya ustanovka* (Heat power installation). The patent of Russia, no. 2421626, 20.06.2011. The bulletin no. 17.
3. Novennikov A.L. *Zhidkostnoe ohlazhdenie avtomobil'nyh dvigatelei* (Liquid cooling of automobile engines). Moscow: Mechanical Engineering, 1985. 176 p.
4. Idelchik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* (Directory on hydraulic resistance). Moscow: Mechanical Engineering, 1975. 559 p.
5. Fiakko A, and Mak-Kormik J. *Nonlinear Programming: Methods of Consecutive Unconditional Minimization*. Moscow: World, 1972. Web.
6. Hasilev V.Y. *Metody i algoritmy rascheta teplovyh setei* (Methods and algorithms of calculation of thermal networks). Moscow: Energy, 1978. 175 p.

Рецензенты:

Мурашов А.А., д.т.н., профессор кафедры математических и естественнонаучных дисциплин Московского финансово-юридического университета МФЮА, г. Москва.

Епархин О.М., д.т.н., профессор, директор Ярославского филиала ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения», г. Ярославль.

Работа поступила в редакцию 22.02.2012.