

ности котлоагрегата по импульсу температуры прямой сетевой воды с поддержанием минимально допустимой температуры теплоносителя на входе в котел.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К а л а ф а т и Д. Д. Применение турбин с противодавлением как перспективное направление повышения эффективности малых и средних ТЭЦ // Теплоэнергетика. — 1992. — № 10. — С. 55 — 60.
2. Ш у б и н Е. П., Л е в и н Б. Н. Проектирование теплоподготовительных установок ТЭЦ и котельных. — М.: Энергоиздат, 1970. — 496 с.
3. Я н к е л е в и ч В. И. Наладка газомазутных промышленных котельных. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 216 с.
4. Л е з н о в Б. С. Экономия электроэнергии в насосных установках. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 144 с.

Представлена  
кафедрой ТЭС

Поступила 19.09.2000

УДК 621.311.22.001.24

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ТЭЦ

Инж. ПОПОВА Ю. Б.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Ввиду ограниченности топливно-энергетических ресурсов задача оптимизации режима тепловых электростанций является актуальной для нашей республики. Ее сложность заключается в том, что экономичность работы тепловых электростанций зависит от большого количества режимных и технических факторов, а сама задача распределения нагрузок на станции является трехмерной, т. е. одновременно и взаимосвязанно необходимо распределять производственные, теплофикационные и электрические нагрузки. Методы относительных приростов и градиентный [1—4], которыми ранее решалась эта задача, неэффективны в случае невыпуклых и негладких видов расходных характеристик агрегатов на ТЭЦ. Первый позволяет лишь при последовательном распределении тепловых и электрических нагрузок получить результат, который, однако, не всегда является оптимальным. Поэтому предлагается использовать метод динамического программирования по трем переменным, поскольку он лишен указанных выше недостатков. Необходимо также отметить, что применение трехмерного динамического программирования стало возможным только в последнее время благодаря появлению быстродействующих ЭВМ.

Поскольку структура ТЭЦ бывает двух основных типов: блочного и с поперечными связями, их математические модели будут несколько отличаться. Блочная ТЭЦ состоит из определенного количества блоков, включающих в себя котел, турбину (с одним или несколькими тепловыми отборами) и генератор. Из-за наличия тепловых отборов каждый

такой блок обладает семейством расходных характеристик. Таким образом, для тепловой электростанции с разнородными видами нагрузок блочного типа задачу оптимального распределения электрической и тепловых нагрузок можно представить в виде следующей математической модели:

$$B_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m f_i(Q_i^n, Q_i^t, N_i) \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_i^n = Q_{\Sigma}^n; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_i^t = Q_{\Sigma}^t; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m N_i = N_{\Sigma}; \quad (4)$$

$$Q_i^n \in [ Q_i^{n \min}; Q_i^{n \max} ], i = 1, 2, \dots, m; \quad (5)$$

$$Q_i^t \in [ Q_i^{t \min}; Q_i^{t \max} ], i = 1, 2, \dots, m; \quad (6)$$

$$((N_i = 0) \wedge ((Q_i^n = 0) \vee (Q_i^t = 0))) \nabla ( N_i \in [ N_i^{\min}(Q_i^n, Q_i^t); N_i^{\max}(Q_i^n, Q_i^t) ] ), \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

где  $B_{\Sigma}$  – суммарный расход топлива на станции;

$Q_i^n, Q_i^t, N_i$  – соответственно производственная, теплофикационная и электрическая мощности  $i$ -го блока ТЭЦ;

$f_i(Q_i^n, Q_i^t, N_i)$  – расходная характеристика  $i$ -го блока ТЭЦ;

$m$  – количество блоков на станции;

$Q_{\Sigma}^n, Q_{\Sigma}^t, N_{\Sigma}$  – заданные соответственно производственная, теплофикационная и электрическая нагрузки станции;

$Q_i^{n \max}, Q_i^{t \max}$  – соответственно максимально возможная производственная и теплофикационная мощности  $i$ -го блока;

$N_i^{\min}(Q_i^n, Q_i^t), N_i^{\max}(Q_i^n, Q_i^t)$  – соответственно технический минимум и максимальная электрическая мощность  $i$ -го блока ТЭЦ при фиксированных производственной и теплофикационной мощностях.

Для ТЭЦ с поперечными связями характерно наличие турбинного и котельного цехов. Котлы работают на один общий коллектор, пар из которого затем подается к работающим турбинам. Для оптимизации режима тепловых электростанций с поперечными связями предлагается декомпозиция задачи, которая заключается в следующем. На первом этапе решается подзадача оптимального распределения заданных производственной, теплофикационной и электрической нагрузок для турбинного цеха, а на втором этапе полученный оптимальный расход теплоты

на турбинный цех используется для оптимизации режима котельного цеха. Таким образом, с использованием принципа декомпозиции математическая модель может быть представлена в следующем виде:

для турбинного цеха —

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m f_i(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{т}}, N_i) \rightarrow \min; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_i^{\text{п}} = Q_{\Sigma}^{\text{п}}; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_i^{\text{т}} = Q_{\Sigma}^{\text{т}}; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m N_i = N_{\Sigma}; \quad (11)$$

$$Q_i^{\text{п}} \in [ Q_i^{\text{п min}}; Q_i^{\text{п max}} ], i = 1, 2, \dots, m; \quad (12)$$

$$Q_i^{\text{т}} \in [ Q_i^{\text{т min}}; Q_i^{\text{т max}} ], i = 1, 2, \dots, m; \quad (13)$$

$$((N_i = 0) \wedge ((Q_i^{\text{п}} = 0) \vee (Q_i^{\text{т}} = 0))) \nabla ( N_i \in [ N_i^{\text{min}}(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{т}}); N_i^{\text{max}}(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{т}}) ] ), \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

где  $Q_{\Sigma}$  — суммарный расход теплоты турбинного цеха;

$f_i(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{т}}, N_i)$  — расходная характеристика  $i$ -й турбины;

$Q_{\Sigma}^{\text{п}}, Q_{\Sigma}^{\text{т}}, N_{\Sigma}$  — заданные соответственно производственная, теплофикационная и электрическая нагрузки станции;

$Q_i^{\text{п max}}, Q_i^{\text{т max}}$  — соответственно максимально возможная производственная и теплофикационная мощности  $i$ -й турбины;

$N_i^{\text{min}}(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{т}}), N_i^{\text{max}}(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{т}})$  — соответственно технический минимум и максимальная электрическая мощность  $i$ -й турбины при фиксированных производственной и теплофикационной мощностях;

$m$  — количество турбинных установок на станции;

для котельного цеха —

$$B_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n B_j = \sum_{j=1}^n g_j(Q_j^{\text{к}}) \rightarrow \min; \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n Q_j^{\text{к}} = Q_{\Sigma}; \quad (16)$$

$$Q_j^{\text{к}} \in [ Q_j^{\text{к min}}; Q_j^{\text{к max}} ], j = 1, 2, \dots, n; \quad (17)$$

$$Q_{\Sigma} \in [ Q_{\Sigma}^{\kappa \min}; Q_{\Sigma}^{\kappa \max} ], \quad (18)$$

где  $B_{\Sigma}$  — суммарный расход топлива по станции;

$g_j(Q_j^{\kappa})$  — расходная характеристика  $j$ -го котла;

$n$  — количество котлов на станции;

$Q_j^{\kappa \min}, Q_j^{\kappa \max}$  — соответственно технический минимум и располагаемая тепловая мощность  $j$ -го котла;

$Q_{\Sigma}^{\kappa \min}, Q_{\Sigma}^{\kappa \max}$  — соответственно технический минимум и располагаемая мощность котельного цеха.

Решение (1)—(7) и (8)—(14) предлагается осуществлять методом трехмерного динамического программирования, а (15)—(18) — методом одномерного динамического программирования. Необходимо добавить, что решение указанных выше задач позволит построить эквивалентную характеристику всей станции.

Решение задач методом трехмерного динамического программирования разбивается на два этапа: прямой ход динамического программирования и обратный [5].

На первом этапе для любого фиксированного  $i \in [1, m]$  строится функция Беллмана  $Bel^i(X^i, Y^i, Z^i)$  и определяются ее решения —  $Q_i^{n \text{ опт}}(X^i, Y^i, Z^i), Q_i^{t \text{ опт}}(X^i, Y^i, Z^i), N_i^{\text{ опт}}(X^i, Y^i, Z^i)$  — при фиксированных значениях  $X^i, Y^i, Z^i$ , которые изменяются в определенных пределах и являются соответственно возможной суммарной производственной, теплофикационной и электрической мощностью станции при  $i$  работающих агрегатах (верхние индексы указывают на количество совместно работающих агрегатов, а нижние — на порядковый номер рассматриваемого агрегата). Значение функции Беллмана для некоторой тройки  $X^i, Y^i, Z^i$  равно суммарному расходу теплоты или топлива, в зависимости от решаемой задачи, на  $i$  работающих агрегатах, при условии, что суммарные нагрузки  $X^i, Y^i, Z^i$  распределяются между этими агрегатами оптимально.

Для  $i = 1$ :

$$Bel^1(X^1, Y^1, Z^1) = f_1(X^1, Y^1, Z^1); \quad (19)$$

$$Q_1^{n \text{ опт}}(X^1, Y^1, Z^1) = X^1; \quad (20)$$

$$Q_1^{t \text{ опт}}(X^1, Y^1, Z^1) = Y^1; \quad (21)$$

$$N_1^{\text{ опт}}(X^1, Y^1, Z^1) = Z^1, \quad (22)$$

где переменные  $X^1, Y^1, Z^1$  изменяются с некоторыми шагами в интервалах:

$$X^1 \in [ Q_1^{n \text{ мин}}; Q_1^{n \text{ макс}} ]; \quad (23)$$

при фиксированном  $X^1$  из (23)

$$Y^1 \in [ Q_1^{t \text{ мин}}; Q_1^{t \text{ макс}} ]; \quad (24)$$

при фиксированных  $X^1, Y^1$  из (23), (24)

$$Z^1 \in [ N_1^{\min}; N_1^{\max} ], \quad (25)$$

где  $f_1(X^1, Y^1, Z^1)$  – расходная характеристика первого рассматриваемого агрегата.

При любом фиксированном  $i \in (1, m)$

$$\text{Bel}^i(X^i, Y^i, Z^i) = \min_{Q_i^n, Q_i^t, P_i} [ f_i(Q_i^n, Q_i^t, N_i) + \text{Bel}^{i-1}(X^i - Q_i^n, Y^i - Q_i^t, Z^i - N_i) ], \quad (26)$$

где

$$X^i \in [ \min(X^{i-1}; Q_i^{n \min}); X^{i-1 \max} + Q_i^{n \max} ]; \quad (27)$$

при фиксированном  $X^i$  из (27)

$$Y^i \in [ \min(Y^{i-1}; Q_i^{t \min}); Y^{i-1 \max} + Q_i^{t \max} ]; \quad (28)$$

при фиксированных  $X^i, Y^i$  из (27), (28)

$$Z^i \in [ \min(Z^{i-1 \min}; N_i^{\min}); Z^{i-1 \max} + N_i^{\max} ]; \quad (29)$$

при фиксированных  $X^i, Y^i, Z^i$  из (27)–(29)

$$Q_i^n \in [ Q_i^{n \min}; \min(Q_i^{n \max}; X^i) ]; \quad (30)$$

при фиксированных  $X^i, Y^i, Z^i, Q_i^n$  из (27)–(30)

$$Q_i^t \in [ Q_i^{t \min}; \min(Q_i^{t \max}; Y^i) ]; \quad (31)$$

при фиксированных  $X^i, Y^i, Z^i, Q_i^n, Q_i^t$  из (27)–(31)

$$((Z^i < N_i^{\min}) \wedge (N_i = 0)) \nabla (N_i \in [ N_i^{\min}; \min(N_i^{\max}, Z^i) ] \cup 0). \quad (32)$$

Ситуация, когда  $N_i = 0$ , означает, что агрегат не работает. Ее необходимо рассматривать при каждом изменяющемся  $Z^i$  для того, чтобы определить, сможет ли покрыть суммарную электрическую нагрузку  $Z^i$   $(i - 1)$ -й состав оборудования.

Второй этап – обратный ход трехмерного динамического программирования – состоит в последовательном определении искомым оптимальных производственной, теплофикационной и электрической мощностей согласно следующим зависимостям:

$$Q_m^{n*} = Q_m^{n \text{ опт}}(Q_\Sigma^n, Q_\Sigma^t, N_\Sigma), \dots, Q_1^{n*} = Q_1^{n \text{ опт}}(Q_\Sigma^n - \sum_{i=2}^m Q_i^{n \text{ опт}}, Q_\Sigma^t - \sum_{i=2}^m Q_i^{t \text{ опт}}, N_\Sigma - \sum_{i=2}^m N_i^{\text{опт}}); \quad (33)$$

$$Q_m^{T*} = Q_m^{T \text{ опт}}(Q_{\Sigma}^n, Q_{\Sigma}^T, N_{\Sigma}), \dots, Q_1^{T*} = Q_1^{T \text{ опт}}(Q_{\Sigma}^n - \sum_{i=2}^m Q_i^{n \text{ опт}}, Q_{\Sigma}^T - \sum_{i=2}^m Q_i^{T \text{ опт}}, N_{\Sigma} - \sum_{i=2}^m N_i^{\text{опт}}); \quad (34)$$

$$N_m^* = N_m^{\text{опт}}(Q_{\Sigma}^n, Q_{\Sigma}^T, N_{\Sigma}), \dots, N_1^* = N_1^{\text{опт}}(Q_{\Sigma}^n - \sum_{i=2}^m Q_i^{n \text{ опт}}, Q_{\Sigma}^T - \sum_{i=2}^m Q_i^{T \text{ опт}}, N_{\Sigma} - \sum_{i=2}^m N_i^{\text{опт}}). \quad (35)$$

Далее, определив расход топлива (для ТЭЦ блочного типа) или расход теплоты на турбинный цех (для ТЭЦ неблочного типа) при найденных оптимальных значениях производственной, теплофикационной и электрической мощностях, задачи (1)–(7) и (8)–(14) можно считать решенными. Для решения задачи (15)–(18) на прямом ходе динамического программирования составляются функции Беллмана аналогично (19) и (26), но по одной переменной, а на обратном – определяется оптимальный расход теплоты каждого котла аналогично (33) и суммарный оптимальный расход топлива по станции.

Автором предлагается программное обеспечение для решения задач (1)–(7) и (8)–(14), реализованное на языке Borland C++ под Builder v. 4.0. К основным возможностям программы можно отнести следующие.

1. Работа с данными турбоагрегатов – создание новых данных, удаление старых, редактирование и копирование их расходных характеристик, сохранение данных в файле. Расходные характеристики турбоагрегатов хранятся в табличном виде и для создания расходной характеристики нового турбоагрегата необходимо указать его допустимые рабочие интервалы по производственной, теплофикационной и электрической мощностям. Предусмотрены таблицы для данных турбоагрегатов с одним и двумя тепловыми отборами. Для ТЭЦ с поперечными связями предусмотрено создание очередей, где можно указать, какие турбины и котлы к ним относятся (рис. 1), благодаря чему отсутствует привязанность программы к какой-то определенной структурной схеме ТЭЦ.

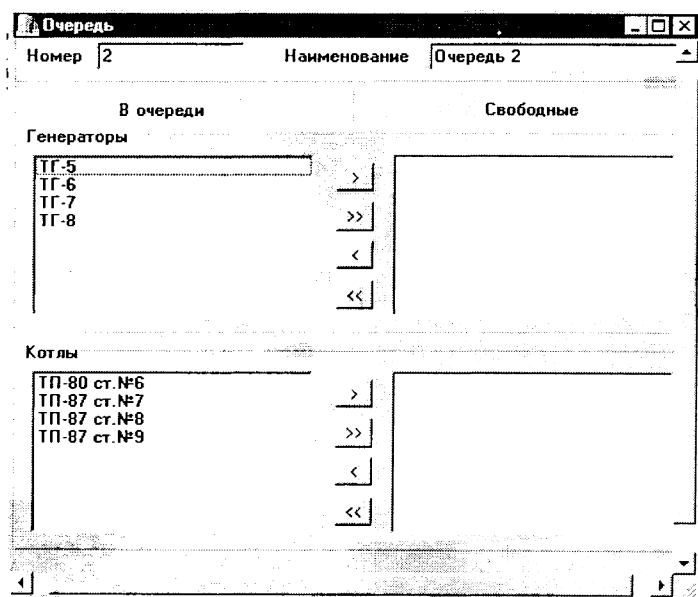


Рис. 1. Создание очереди для ТЭЦ с поперечными связями

2. Расчет оптимального режима ТЭЦ на час суток, а также на интервалах заданных производственной, теплофикационной и электрической нагрузках (рис. 2), что позволяет построить оптимальную расходную характеристику станции блочного типа или турбинного цеха для неблочной ТЭЦ.

Предусмотрены два вида расчета: расчет таблицы до значений заданных нагрузок и чтение рассчитанной таблицы из файла. Первый вид расчета наиболее эффективен для режима с малыми значениями нагрузок, поскольку прямой ход динамического программирования идет только до заданных нагрузок. Время расчета при этом зависит главным образом от заданной производственной нагрузки, поскольку внешний цикл расчета выполнен именно по этому типу нагрузки. Для четырех турбоагрегатов с двумя тепловыми отборами были проведены экспериментальные расчеты на ЭВМ с процессором Pentium-200MMX, на которые затрачивалось от трех секунд (область минимально возможных нагрузок) до 40 минут (область максимальных нагрузок).

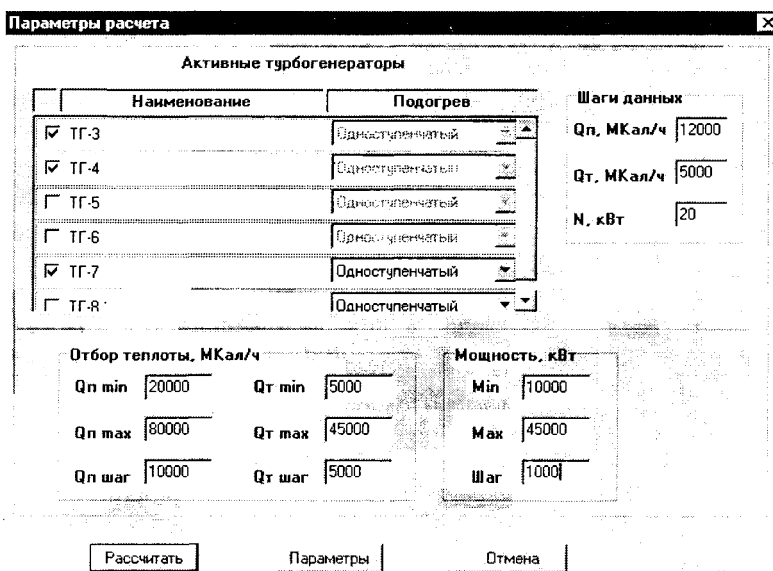


Рис. 2. Выбор состава работающего оборудования и интервалов нагрузок

Второй вид расчета позволяет полностью выполнить прямой ход динамического программирования для выбранного состава турбоагрегатов и сохранить таблицу минимумов для этого состава в одноименном файле. На обратном ходе динамического программирования будут определяться лишь строки с соответствующими заданными нагрузками. Таким образом, единожды выполнив долгий по времени расчет для определенного состава оборудования, можно задавать другие нагрузки, получая при этом ответ всего за несколько секунд. Однако необходимо заметить, что хранение таблицы минимумов может занимать достаточно много места на жестком диске и доходить до 3 Мбайт при шести работающих агрегатах.

3. Получение и просмотр результатов в виде отчетов с возможным выводом на печать. Предусмотрено сохранение результатов в одноименных с данными файлах, но с расширением \*.rez. Возможно также добав-

ление к предыдущим либо обновление результатов. При получении оптимального режима с несколькими вариантами загрузки оборудования на экран выводятся все возможные варианты (рис. 3).

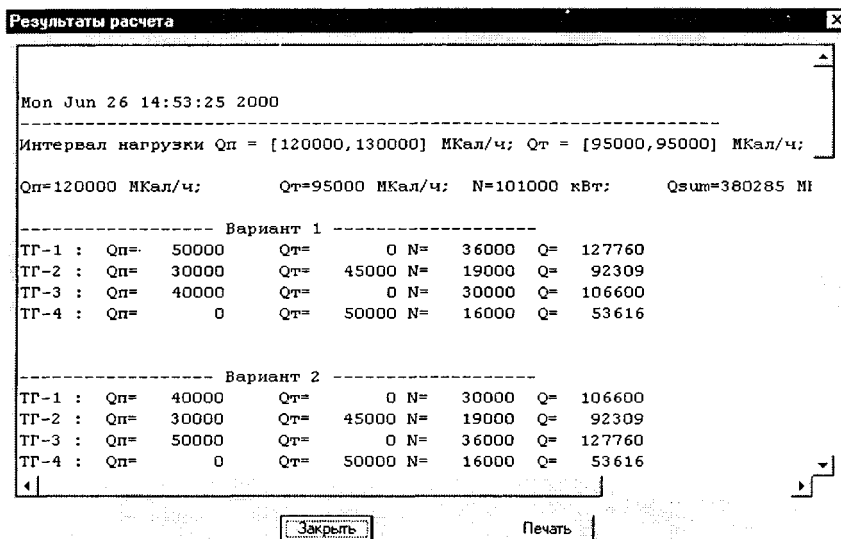


Рис. 3. Результаты расчета

## ВЫВОДЫ

1. Предложены математические модели для решения задачи оптимизации тепловых электростанций с разнородными видами нагрузок блочного типа и поперечными связями.

2. Предложен новый алгоритм для решения задачи оптимизации режима тепловых электростанций методом трехмерного динамического программирования.

3. Разработана программа, позволяющая решить этим методом задачу оптимизации ТЭЦ блочного типа и турбинного цеха для ТЭЦ с поперечными связями при фиксированных начальных параметрах пара и давлении пара в отборах.

4. Тестирование программы на контрольном примере показало ее работоспособность, надежность и возможность практического применения в составе АСУ ТЭЦ.

5. Экспериментальные данные показали, что экономический эффект использования программы достигает 3–5 % от суммарного расхода топлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методы оптимизации режимов энергосистем / Под ред. В. М. Горнштейна. — М.: Энергия, 1981. — 336 с.
2. Веников В. А., Журавлев В. Г., Филиппова Т. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. — М.: Энергоиздат, 1982. — 464 с.
3. Запольский А. Н. О наиболее выгодном распределении тепловой нагрузки ТЭЦ между отдельными турбоагрегатами // Электрические станции. — 1961. — № 11. — С. 23–28.



4. К р у м м Л. А., П у н ч а с А. А., Т р у щ е л е в а Л. А. К оптимизации режима ТЭС градиентным методом // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1967. — № 6. — С. 9—20.

5. Г а б а с о в Р., К и р и л л о в а Ф. М. Основы динамического программирования. — Мн.: БГУ, 1975. — 259 с.

Представлена кафедрой  
программного обеспечения  
вычислительной техники  
и автоматизированных систем

Поступила 27.07.2000

УДК 532.517.4

## **РАСЧЕТЫ ОДНОРОДНЫХ СДВИГОВЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ЗАМКНУТЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ВТОРЫХ ДВУХТОЧЕЧНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МОМЕНТОВ**

**Асп. ШЕЛЕГЕДИНА Е. Н.**

*Санкт-Петербургский государственный технический университет*

Для решения прикладных гидрогазодинамических задач в области энергетики (расчеты турбулентных течений жидкостей и газов в соплах, проточных частях турбомашин, камерах сгорания, диффузорах и т. д.) широко применяются полуэмпирические модели турбулентности. Однако, несмотря на более чем тридцатилетний опыт разработок и использования таких моделей, до сих пор все они имеют ограниченную универсальность. Следует отметить, что практически все современные полуэмпирические модели турбулентности базируются на одноточечных статистических характеристиках турбулентности. Один из возможных путей усовершенствования полуэмпирических моделей — использование двухточечных характеристик турбулентности, с помощью которых можно получить значительно больше информации о структуре турбулентного потока. Разработка полуэмпирических моделей на базе двухточечных моментов является актуальной задачей как в свете возможности усовершенствования с их помощью широко применяемых в инженерной практике моделей типа « $k - \varepsilon$ », « $k - kb$ », модели рейнольдсовых напряжений и т. п. (как, например, в [1–4]), так и для самостоятельного их использования при изучении турбулентных течений.

Построение моделей на основе уравнений для двухточечных моментов второго порядка имеет два направления. Одно направление заключается в использовании спектральной формы этих уравнений (однако модели такого типа не получили широкого распространения на практике, поскольку замыкающие формулы для спектральных уравнений весьма сложны), второе — базируется на использовании уравнений для двухточечных корреляций, записанных в физических координатах, замыкание которых может быть осуществлено посредством гораздо более простой и наглядной градиентной гипотезы, позволяющей выразить