7. *Липанов, А. М.* Проектирование ракетных двигателей твердого топлива / А. М. Липанов, А. В. Алиев. – М. : Машиностроение, 1995.

УДК 621.384.3+519.6

М. С. Вологдина, аспирант;
С. В. Вологдин, кандидат технических наук, доцент;
В. А. Тененев, доктор физико-математических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ И АДЕКВАТНОСТИ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОМ НАГРЕВАТЕЛЕ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Исследуется сходимость численного метода, используемого для расчета процессов, протекающих в инфракрасном нагревателе неосесимметричной конструкции. Адекватность метода проверялась на решении тестовых задач.

Для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающей течение в трубах-излучателях инфракрасного нагревателя неосесимметричной конструкции [1, 2], был реализован описанный в [3] численный метод «SIMPLE» (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations – полунеявный метод для уравнений, связанных через давление), опирающийся на решение уравнения Пуассона для поправок к давлению.

Апробация метода проводилась на решении тестовых задач: определение параметров несжимаемого осесимметричного течения в круглой трубе при ламинарном и турбулентном режимах.

Сходимость метода численного решения была установлена путем измельчения конечно-разностной сетки с коэффициентом сгущения q по радиальной координате.

На рис. 1 представлено изменение значения нормы относительной погрешности ξ в зависимости от количества узлов N и M в направлениях r, x соответственно при ламинарном режиме течения. В качестве ξ рассматривается среднеквадратическое отклонение расчетного профиля скорости на выходе от теоретического профиля Пуазейля для установившегося течения в трубе [4]:

$$\xi = 100\% \sqrt{\sum_{i}^{N} \left(\left(u_i - u_i^* \right) / u_i^* \right)^2} \Big/ N,$$

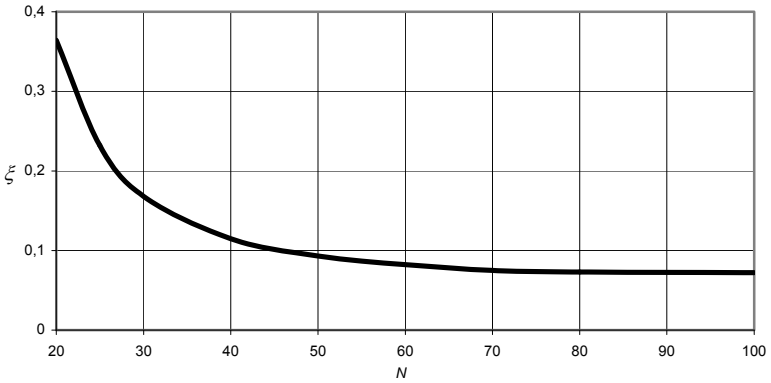
где u_i, u_i^* – расчетное и теоретическое значения продольной скорости.

При расчете ламинарного течения использовались следующие параметры сетки: в направлении r задавалось от 20 до 100 узлов сетки, в направлении x – от 20 до 100 узлов.

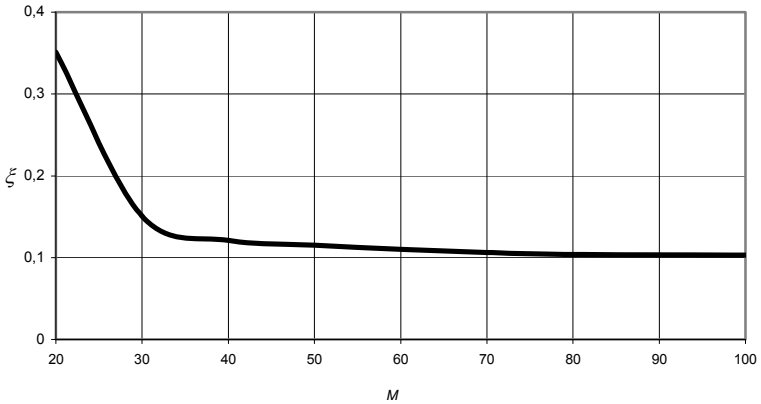
С увеличением количества узлов N в направлении r при фиксированном $M = 50$, от 20 до 40 значение нормы относительной погрешности ξ уменьшилось на

© Вологдина М. С., Вологдин С. В., Тененев В. А., 2008

~216,5 %, а с увеличением N от 40 до 70 узлов ξ изменяется на ~53,3 % (рис. 1, *а*). С дальнейшим увеличением количества узлов изменение значения ξ происходит на ~4,2 % и достигает значения ~0,07 %.



а



б

Рис. 1. Зависимость нормы погрешности от числа узлов N и M конечно-разностной сетки при ламинарном режиме течения ($\mathrm{Re} = 10^2$): *а* – в направлении *r*; *б* – в направлении *x*

Аналогичная картина наблюдается при изменении количества узлов в направлении x при фиксированном $N = 50$. При увеличении M от 20 до 40 значение ξ изменяется на ~190,1 %, а с увеличением M от 40 до 70 узлов ξ уменьшается на ~8,5 % (рис. 1, *б*). Дальнейшее увеличение количества узлов приводит к изменению ξ менее чем на ~2,9 %.

На рис. 2 представлено изменение ξ в зависимости от коэффициента сгущения q при $\mathrm{Re} = 10^2$ и сетке 40 на 40 узлов. Как показывает анализ расчетов на сет-

ках различной размерности, оптимальное значение q находится в диапазоне $0,92 \div 0,97$ и зависит от количества разбиений в направлении r.

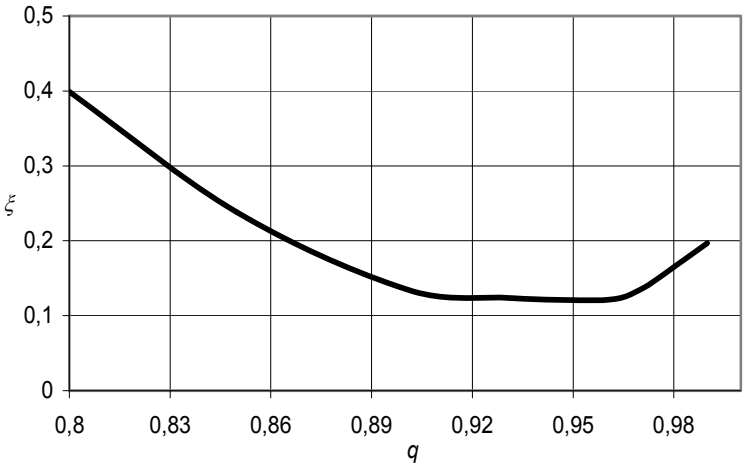


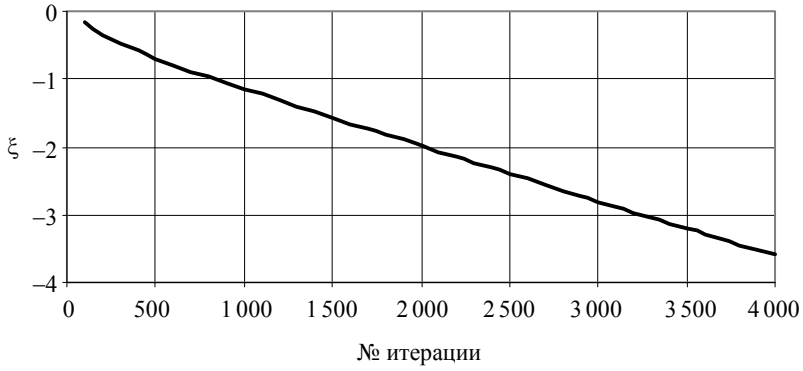
Рис. 2. Зависимость нормы погрешности для u от q

Также исследовалось изменение ξ и характеристики установления вычислительного процесса для давления: $\vartheta = \left|\delta p^{n+1} / p_\infty\right|_{\max}$ в зависимости от номера итерации n (рис. 3). Проведенные расчеты показывают, что характеристику установления процесса следует принимать: $\vartheta \le 10^{-5}$, что на сетке 100×80 соответствует отклонению расчетного профиля скорости от теоретического профиля Пуазейля не более чем на 0,1 %.

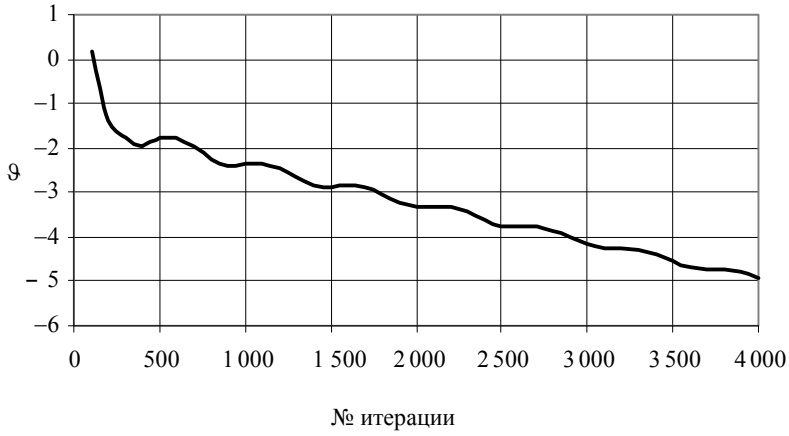
При этом распределение давления в канале имеет вид, представленный на рис. 4. При заданных входных параметрах $\mathrm{Re} = 100, d = 0,1$ м длина начального участка трубы, на котором происходит установление течения, составляет $l_{\text{вх}} = 0,03 d\,\mathrm{Re} = 0,3$ м [5]. Известно, что для установившегося ламинарного течения в круглой трубе давление изменяется линейно по длине трубы и его перепад составляет $\Delta p = \dfrac{4\mu u_{\max} L}{R^2} = \dfrac{4 \cdot 0,01 \cdot 20 \cdot 1}{0,05^2} 320$ Па [5]. Анализируя рис. 4, можно сделать выводы: 1) для установившегося течения расчетный перепад давления совпадает с теоретическим; 2) установление течения происходит в соответствии с теорией, на входном участке длиной $\sim 0,3$ м.

Аналогичные исследования сходимости численного метода были проведены для турбулентного режима течения. Распределение скорости для установившегося турбулентного осесимметричного течения в трубе описывается следующими аналитическими зависимостями: 1) $\eta \le 11$: $u / u_\tau = \eta$; 2) $\eta > 11$: $u / u_\tau = 2,5 \ln \eta + 5,5$ [5]. Соответственно, в качестве ξ рассматривается среднеквадратическое отклонение расчетного профиля скорости на выходе от данной аналитической зависимости. На рис. 5 представлено изменение значения нормы погрешности для скорости при

турбулентном режиме течения в зависимости от количества узлов N в направлении r. При расчете турбулентного течения в направлении r задавалось от 40 до 400 узлов сетки.



а



б

Рис. 3. Динамика установления параметров численного решения:
а – установление ξ; *б* – установление ϑ

С увеличением количества узлов в направлении r при фиксированном $M = 60$, от 40 до 120 значение нормы относительной погрешности ξ уменьшилось на ~146,6 %, а от 120 до 300 узлов ξ изменяется на ~126,6 % (рис. 5). С дальнейшим увеличением количества узлов изменение значения ξ происходит на ~8,2 % и достигает значения ~0,1 %.

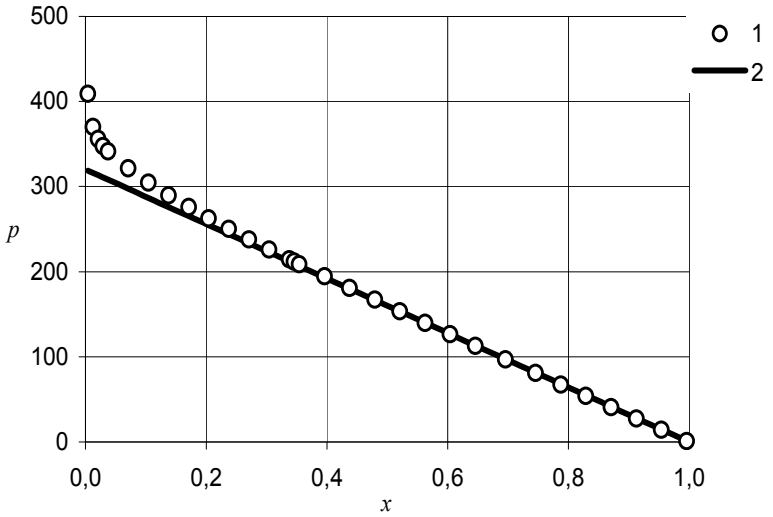


Рис. 4. Распределение давления при Re = 10^2: *1* – расчет; *2* – теория [5]

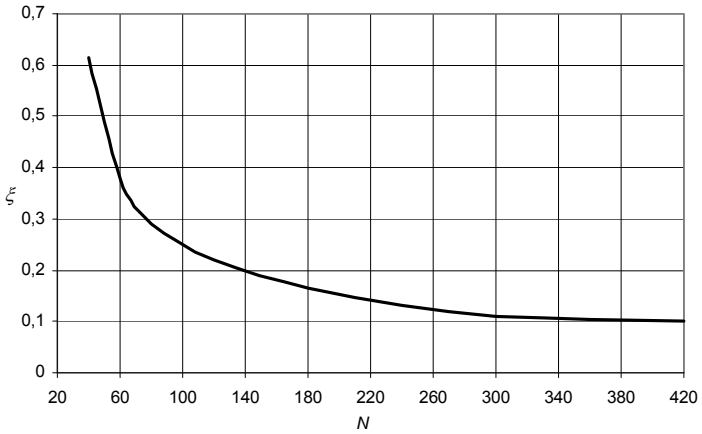


Рис. 5. Зависимость нормы погрешности от числа узлов конечно-разностной сетки при турбулентном режиме течения в направлении *r*

На рис. 6 приведено сравнение расчетных профилей скорости (полученных с использованием алгебраической модели турбулентности и модели Секундова [2]) с аналитической зависимостью распределения скорости в круглой трубе при турбулентном режиме течения.

Использование как алгебраической модели, так и модели Секундова позволяет получать профиль скорости, близкий к теоретическому. Применение алгебраической модели турбулентности дает более хорошее совпадение с теоретическим распределением, но ее применение для областей со сложной геометрией затруднительно, поэтому для моделирования турбулентности использовалась однопараметрическая модель Секундова.

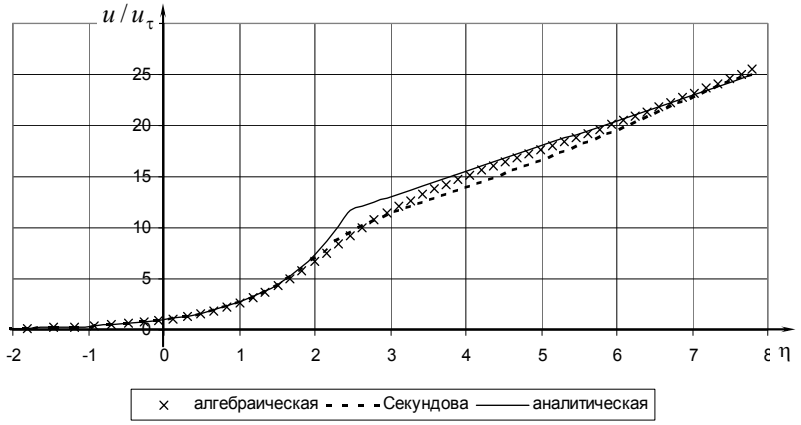


Рис. 6. Профиль скорости при турбулентном течении в круглой трубе

Апробирование выбранной модели турбулентности проводилось на расчете параметров течения в прямоугольной трубе (3,5 : 1). Л. Шиллером и И. Никурадзе [5] было получено, что зависимость коэффициента сопротивления, отнесенного к гидравлическому диаметру, от числа Рейнольдса для труб с некруглым поперечным сечением хорошо передается формулой Блазиуса $\lambda / d_h = 0{,}3164 * (\mathrm{Re})^{-0{,}25}$, где Re – число Рейнольдса; $d_h = 4S / P$ – гидравлический диаметр; S – площадь поперечного сечения трубы; P – смоченный периметр поперечного сечения. Расчетный коэффициент сопротивления определяется по формуле $\lambda = (2\Delta p d_h) / (L \rho u_{\text{ср}}^2)$, где Δp – перепад давления по длине трубы, определяемый по результатам расчета гидродинамики течения; L – длина трубы; ρ – плотность; $u_{\text{ср}}$ – средняя скорость. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимости коэффициента сопротивления от числа Re представлено на рис. 7.

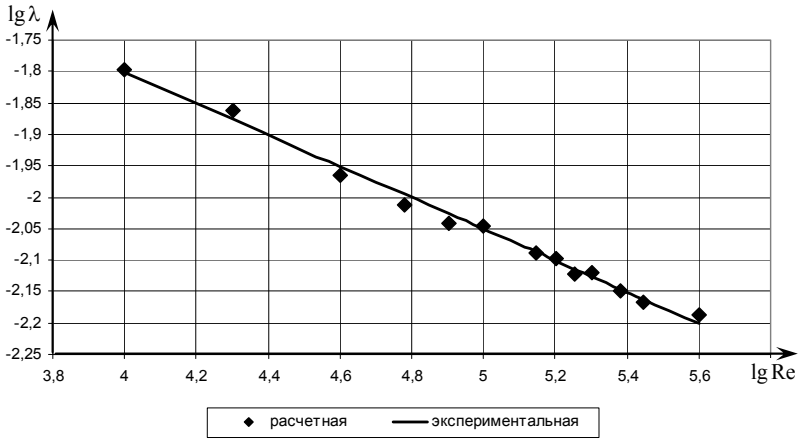


Рис. 7. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса

Таким образом, полученные в ходе вычислительного эксперимента результаты хорошо согласуются с зависимостями тестовых задач, что подтверждает адекватность построенного численного метода.

Список литературы

1. *Вологдина, М. С.* Исследование зависимости параметров в инфракрасном нагревателе неосесимметричной конструкции от значений температуры на границе / М. С. Вологдина, В. А. Тененев // Вестн. ИжГТУ. – 2007. – № 1. – С. 53–58.

2. *Вологдина, М. С.* Турбулентные режимы течения в инфракрасном нагревателе неосесимметричной конструкции / М. С. Вологдина // Вестн. ИжГТУ. – 2008. – № 3.

3. *Патанкар, С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М. : Энергоиздат, 1984. – 150 с.

4. *Лойцянский, Л. Г.* Аэродинамика пограничного слоя / Л. Г. Лойцянский. – М. : Гостехиздат, 1941. – 744 с.

5. *Шлихтинг, Г.* Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1969. – 736 с.

УДК 658.011.56

А. И. Коршунов, кандидат технических наук, доцент;
Н. В. Береснев, аспирант;
Е. А. Игнатьев, инженер
Ижевский государственный технический университет,
Воткинский филиал

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ НОРМАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Статья содержит описание модели, обеспечивающей формирование технологического процесса изготовления машиностроительной деталесборочной единицы с использованием технологических операций, представленных в справочнике нормативной технологии, используемой в конкретной производственной системе. Рассмотрены структуры данных и интерфейсные решения, обеспечивающие реализацию предложенной модели в автоматизированной системе технического нормирования и оценки затрат на изготовление машиностроительного изделия.

Проблема оценки трудоемкости и затрат на изготовление машиностроительного изделия является в настоящее время особенно актуальной для предприятий машиностроительного комплекса России, поскольку снижение себестоимости изготовления изделий является одним из путей повышения их конкурентоспособности на рынке. Предложенный комплексный метод оценки конструктивно-технологической сложности, трудоемкости и затрат на изготовление машиностроительного изделия позволяет решать соответствующие задачи на основных этапах и стадиях его жизненного цикла [1].

Метод обеспечивает несколько уровней прогнозирования и оценки трудоемкости и затрат на изготовление изделия. В соответствии с требованиями к точности оценки рассматриваются уровни прогнозирования, оценивания и нормирования. Наиболее точным является уровень нормирования, в соответствии с которым изделие декомпозируется, на основе иерархии структурных составляющих и их инфор-

© Коршунов А. И., Береснев Н. В., Игнатьев Е. А., 2008