

Выбор конечно-элементной модели для моделирования течения в шнеках

© Н.С. Дорош, С.Н. Леонтьев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены особенности создания конечно-элементных моделей для численного моделирования гидродинамики шнеков бустерных турбонасосных агрегатов. Геометрия шнеков значительно отличается от геометрии рабочих органов лопаточных машин других типов, что затрудняет использование типовых методик для расчета течения. Представлены результаты сравнительного расчета двух конфигураций расчетной геометрии шнека, предложена базовая структура гексаэдрической сетки для выбранной конфигурации.

Ключевые слова: *бустерный турбонасосный агрегат, шнек, конечно-элементная модель, гексаэдрическая сетка.*

Введение. В настоящее время широкое распространение получило компьютерное моделирование гидро- и газодинамики, позволяющее проводить численные эксперименты с высокой точностью для изучения сложных процессов течения жидкости и газа в лопаточных машинах.

Система подачи жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) часто содержит бустерные турбонасосные агрегаты (БТНА), предназначенные для обеспечения бескавитационной работы основного турбонасосного агрегата путем повышения давления на его входе. Предъявляются высокие требования к гидравлическим характеристикам БТНА (антикавитационные свойства, экономичность) при минимальной удельной массе и минимальных относительных линейных размерах. Наиболее полно всем указанным требованиям отвечают лопаточные осевые насосы. Благодаря высоким антикавитационным свойствам и технологичности наибольшее распространение в качестве осевых насосов получили шнеки. Они, в частности, используются в современных БТНА разработки Научно-производственного объединения «Энергомаш им. акад. В.П. Глушко», что делает актуальной задачу их совершенствования путем детального исследования потока в межлопаточном канале и за шнеком. Экспериментальная отработка агрегатов показала существенное расхождение расчетных и действительных параметров. Использование компьютерного моделирования позволит получить детальную картину структуры течения и распределения параметров жидкости в исследуемой области.

Выбор и дискретизация расчетного объема. Одним из основных этапов при компьютерном моделировании является создание конечно-элементной модели. Как правило, сначала создается 3D-модель исследуемого объекта. В данной работе была создана модель шнека бустерного насоса горючего двигателя РД 180 (рис. 1).

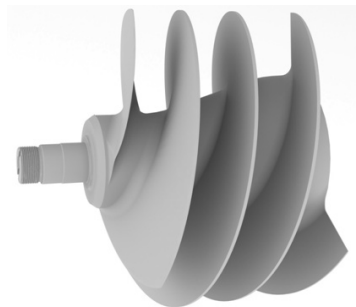


Рис. 1. 3D-модель шнека

Созданную модель нужно «инвертировать» т. е. разработать твердотельную модель проточной части. В настоящее время выбор расчетного объема для лопаточных машин является типовой задачей. Благодаря осевой симметрии лопаточных машин становится возможным сократить потребные расчетные мощности, выделив для расчета лишь сектор проточной части и указав на его границах условия периодичности. Таким образом, расчет будет проводиться для небольшой расчетной области, но его результаты распространятся на все повторяющиеся элементы.

Вследствие особенностей алгоритма расчета перенос параметров через границы периодичности может вносить некоторые погрешности, поэтому границы периодичности рекомендуется располагать в областях с наименьшим градиентом параметров, как правило, ближе к центру межлопаточного канала.

Таким образом, типичная расчетная область для лопаточной машины представляет собой элемент проточной части, включающий рабочую лопатку, что необходимо для получения полной и неразрывной картины ее обтекания [1, 2].

Однако по сравнению с большинством лопаточных машин (турбины, компрессоры, центробежные насосы) шнеки значительно отличаются конфигурацией лопаток:

- обычно шнеки имеют три, реже четыре, лопатки;
- лопатки шнека имеют большую осевую длину;
- лопатки имеют большую пространственную искривленность и поворот по винтовой поверхности, как правило, более 360° .

По этим причинам минимальный расчетный объем оказывается достаточно большим и имеет сложную пространственную конфигурацию [3].

Следующим этапом создания конечно-элементной модели является процесс дискретизации расчетного объема. Создается расчетная сетка, которая разбивает твердотельную модель на элементарные ячейки, для каждой из них в дальнейшем будут рассчитываться параметры потока в соответствии с алгоритмом моделирования.

Качество дискретизации непосредственно влияет на получаемые при моделировании результаты. Элементы малого размера позволяют с большей точностью запечатлеть расчетную геометрию и получить более детальную картину потока в местах резкого изменения параметров, при этом число элементов в модели возрастает. Максимальное число элементарных объемов в модели ограничивается доступными расчетными мощностями, поэтому следует рационально подходить к измельчению расчетной сетки.

Наибольшее распространение получили два вида сеток: тетраэдрические и гексаэдрические (структурированные). Современное программное обеспечение позволяет строить сетки из тетраэдров практически для любых расчетных объемов в автоматическом режиме. В основе создания гексаэдрической сетки лежит построение сложной блочной структуры, блоки в дальнейшем могут быть разбиты на любое число элементов при заданном законе изменения шага элементов (для локального измельчения сетки). Гексаэдрические сетки требуют меньших объемов памяти для хранения данных, т. е. структурированная сетка может содержать большее число элементов, чем неструктурированная, при одинаковых затратах расчетных ресурсов.

Единожды построенная структурированная сетка при написании алгоритма может быть перестроена с небольшим изменением геометрии, что можно использовать при вариантных расчетах.

Сравнение вариантов конфигурации расчетных объемов для шнека. Для сравнения были выбраны две конфигурации расчетных объемов (рис. 2).

Первая конфигурация создана по рекомендациям для типовых лопаточных машин, ее проточная часть представляет собой две половины межлопаточных каналов, целиком охватывающих одну лопатку шнека, границы периодичности проходят по поверхности разделения каналов и на входном и выходном участках (рис. 2, а).

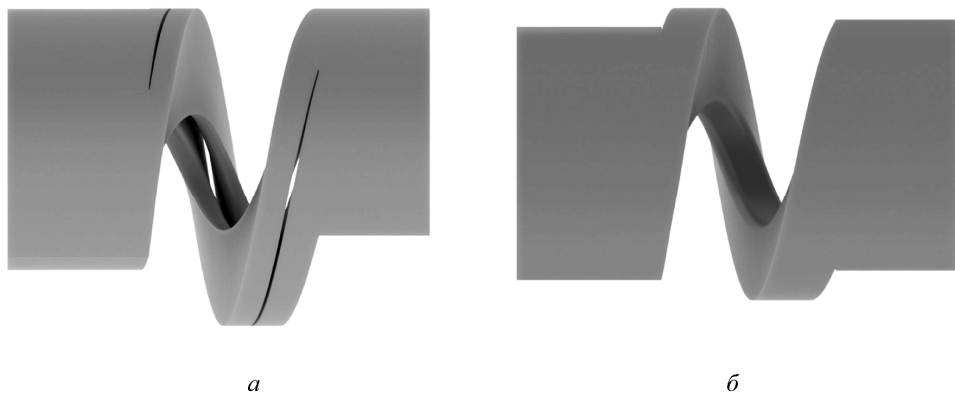


Рис. 2. Варианты конфигурации расчетных объемов

Вторая конфигурация представляет собой один межлопаточный канал целиком, ограниченный поверхностями двух лопаток, границы периодичности установлены на входном и выходном кольцевых участках (рис. 2, б). Этот вариант выбран из соображений упрощения геометрии и последующей дискретизации.

В целях сокращения времени подготовки расчетной модели при сравнительном моделировании для обеих конфигураций были автоматически сгенерированы тетраэдрические сетки с одинаковыми параметрами.

Для каждой конечно-элементной модели был проведен расчет в программном пакете ANSYS при одинаковых начальных условиях (давление на входе, расход на выходе, скорость вращения, рабочее тело). На рис. 3 и 4 приведены результаты моделирования течения для выбранных конфигураций (см. рис. 2).

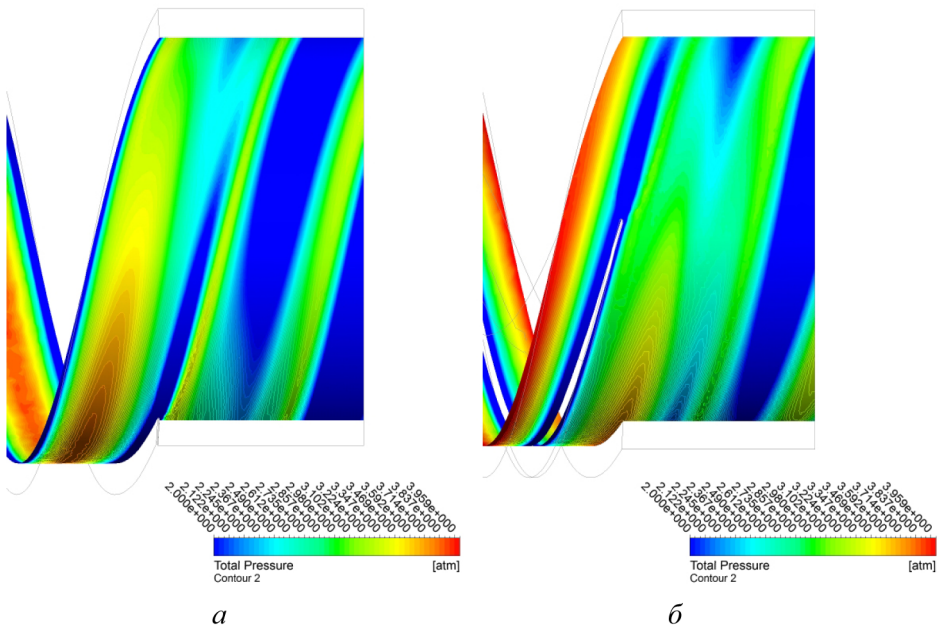
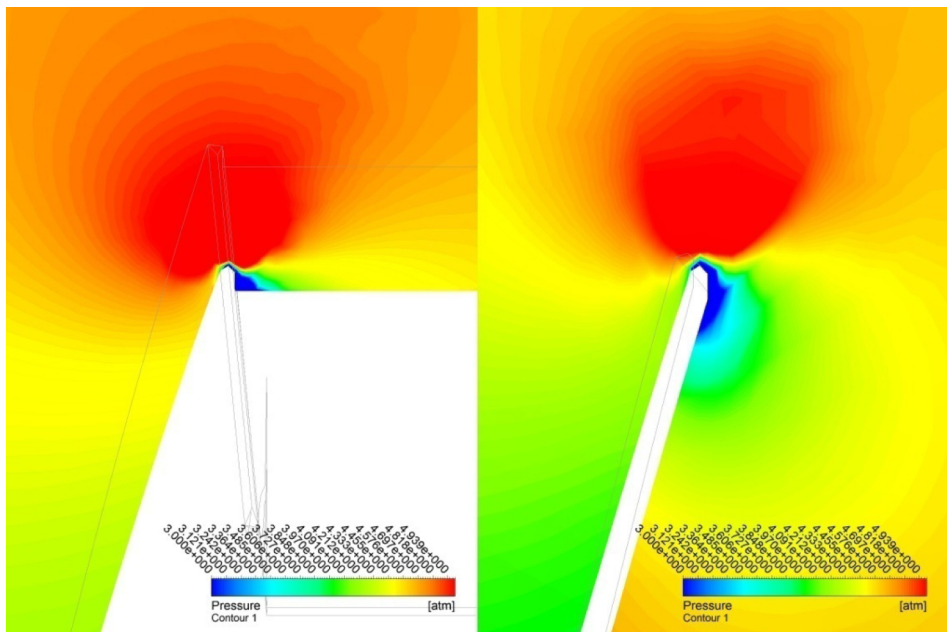


Рис. 3. Распределение полного давления

При сравнительном анализе полученных данных можно сделать вывод о схожести картин течения на выходе из шнека. На основании этого можно считать, что для несжимаемой жидкости при течении такого характера перенос параметров через границы периодичности происходит корректно. Это позволяет заключить, что использование геометрии цельного межлопаточного канала шнека для создания конечно-элементной модели допустимо и оправданно.



а

б

Рис. 4. Градиент давления у кромки лопатки

Топология расчетной сетки межлопаточного канала. После утверждения типа расчетной геометрии можно перейти к разработке топологии структурированной сетки, чтобы создать типовую блочную структуру, которая будет использоваться для дискретизации. Как правило, профиль межлопаточного канала шнека представляет собой перевернутую трапецию со скругленными углами у меньшего основания. На рис. 5 приведена схема блоков для такого сечения, разбивающая профиль на базовые параллелепипеды.

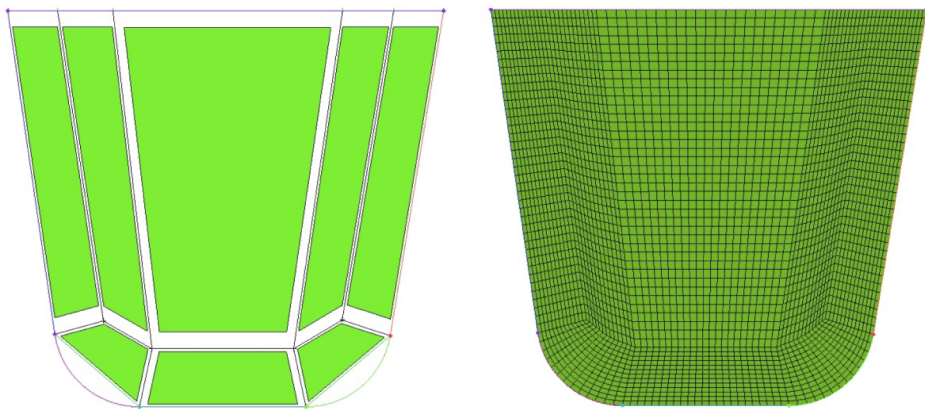


Рис. 5. Блочная структура межлопаточного канала

Такая структура блоков сохраняется на всем протяжении модели межлопаточного канала. Входной и выходной участки представляют собой кольцевые секторы, дискретизация которых не вызывает серьезных затруднений. В то же время геометрия входной и выходной кромок лопатки достаточно сложна и может варьироваться, поэтому невозможно дать однозначные рекомендации для построения блочной структуры этой области. Одним из вариантов решения проблемы может стать создание локальной тетраэдрической сетки для этого участка.

На рис. 6 представлена конечно-элементная модель для гидродинамического расчета шнека со структурированной сеткой межлопаточного канала, созданная по приведенным выше рекомендациям.

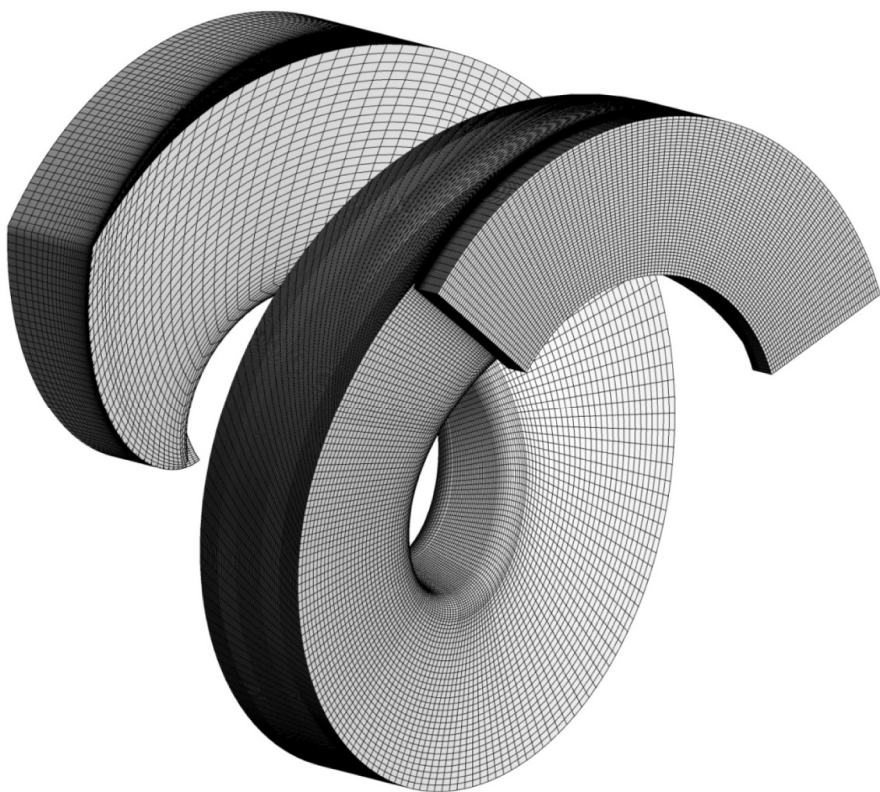


Рис. 6. Окончательный вид конечно-элементной модели

Заключение. В работе рассмотрены различные подходы к численному моделированию течения в шнеках агрегатов ЖРД, в частности — при создании конечно-элементной модели. Приведены общие рекомендации по выбору и дискретизации расчетного объема при моделировании лопаточных машин, указаны особенности геометрии шнеков, требующие использования индивидуального подхода. С уче-

том сделанных рекомендаций было проведено сравнительное моделирование двух вариантов конфигурации расчетного объема для проверки алгоритма переноса параметров через границы периодичности. Анализ результатов моделирования показывает, что допустимо использовать упрощенный вариант геометрии при создании расчетной модели. На основании этого предложен вариант оптимальной топологии структурированной гексаэдрической сетки для дискретизации расчетного объема. Приведенные рекомендации позволят повысить качество и упростить процесс создания конечно-элементной модели шнеков, который является важным подготовительным этапом численного моделирования их гидродинамики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Donghyun You, Meng Wang. Vortex Dynamics and Low-Pressure Fluctuations in the Tip-Clearance Flow. *J. of Fluids Engineering*, vol. 129, August 2007.
- [2] Chand K.K., Lee K.D. *Turbomachinery Blade Optimization Using the Navier-Stokes Equations*. Preprint. Lawrence Livermore National Laboratory, 1997, UCRL-JC-129284, 10 p.
- [3] Nobuhiro Yamanishi, Shinji Fukao. LES Simulation of Backflow Vortex Structure at the Inlet of an Inducer. *J. of Fluids Engineering*, vol. 129, May 2007.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Дорош Н.С., Леонтьев С.Н. Выбор конечно-элементной модели для моделирования течения в шнеках. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/701.html>

Дорош Никита Сергеевич — аспирант кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: doroshnikita@gmail.com

Леонтьев Сергей Николаевич — доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук, окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: lsn_pro@mail.ru