

# Параметризация исполнительных элементов перекачивающих электромеханических преобразователей



Константин КИМ  
Konstantin K. KIM

Алексей ПРОСОЛОВИЧ  
Aleksey A. PROSOLOVICH



Юлия КОЛОШЕНКО  
Yuliya V. KOLOSHENKO

*Ким Константин Константинович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия.  
*Просолович Алексей Александрович* – доцент Комсомольского-на-Амуре государственного университета, Комсомольск-на-Амуре, Россия.  
*Колошенко Юлия Борисовна* – старший преподаватель КнАГУ, Комсомольск-на-Амуре, Россия.

## Parameterization of Actuating Elements of Pumping Electromechanical Converters

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 37)

**Рассматривается вопрос об обоснованности выбора параметров исполнительного элемента теплогенерирующих перекачивающих устройств с лопастными конструкциями. Эти устройства характеризуются низким гидравлическим сопротивлением рабочего канала, отсутствием традиционных опор и герметизирующих деталей, широким диапазоном конструктивных модификаций повышенной эффективности. Их особенностью является то, что несущим элементом выступает не традиционный вал, а наружная поверхность исполнительного механизма. В статье показано, какими именно параметрами используемых элементов обеспечиваются моделирование и управление процессами теплопередачи.**

**Ключевые слова:** транспортная энергосистема, теплогенерирующее перекачивающее устройство, исполнительный элемент, параметры, 3D-модель, независимое управление.

Перекачивающие устройства с лопастными исполнительными элементами широко используются в промышленных и транспортных энергосистемах. Традиционно они представлены центробежными, осевыми или диагональными насосами, вентиляторами и компрессорами, агрегатированными с регулируемыми приводными электродвигателями. При этом, несмотря на такие достоинства, как существенное снижение гидравлического сопротивления рабочего канала, отсутствие опор и герметизирующих деталей, расширенный диапазон конструктивных модификаций повышенной эффективности, лишь незначительная часть лопастных устройств несущим элементом имеет не традиционный вал, а наружную поверхность исполнительного механизма. И это стало возможным только после появления принципиально нового типа функционально совмещённых перекачивающих электромеханических преобразователей (ПЭП), у которых исполнительный элемент является неотъемлемой частью приводного механизма [1–3].

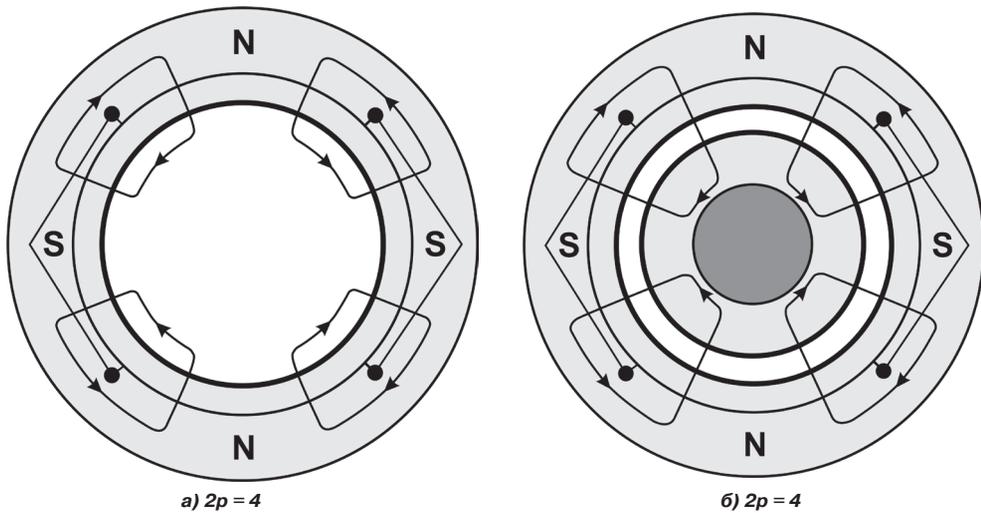


Рис. 1. Силовые линии магнитного поля при отсутствии (а) и наличии (б) внутреннего ферромагнитопровода.

### ОТ ОБЩЕГО К ЧАСТНОМУ

Основной особенностью ПЭП как устройства для перемещения нагреваемой среды является чрезвычайно малое гидравлическое сопротивление, обусловленное отсутствием вала и классических подшипниковых узлов. В то же время такая конструкция при отсутствии внутреннего ферромагнитопровода характеризуется

значительным намагничивающим реактивным током и потребляемой мощностью, приводящим к нагреву герметичного статора ПЭП, что связано с повышенным магнитным сопротивлением намагничивающего контура и таким распределением электромагнитного поля, при котором большая часть его силовых линий проходит по немагнитному участку внутри устрой-

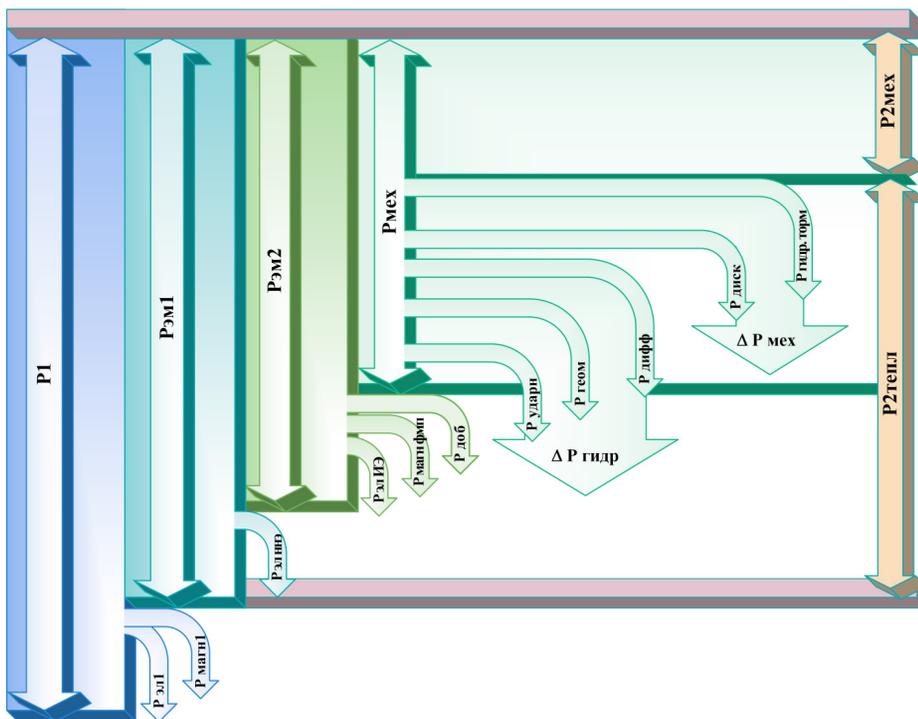


Рис. 2. Энергетическая диаграмма ПЭП.

ва. На рис. 1 для сравнения показано распределение магнитного поля во внутренней области ПЭП (а) и асинхронного двигателя (б) для четырёхполюсного исполнения.

Принцип действия ПЭП, поясняющий преобразование энергии в рассматриваемом совмещённом устройстве, основан на анализе процессов, характерных для традиционных электромеханических преобразователей.

На рис. 2 приведена энергетическая диаграмма ПЭП, на которой проиллюстрировано преобразование и распределение мощностей с выделением всех составляющих потерь, определяющих эффективность устройства.

Из диаграммы видно, что выходная мощность ПЭП представляет сумму тепловой и механической мощностей и определяется потребляемой мощностью  $P_1$ . При этом мощность, идущая на перемещение и нагрев рабочей среды, составляет разность между  $P_1$  и всеми потерями, за исключением электрических в первичной обмотке  $P_{эл1}$  и магнитных — в стали герметичного магнитопровода  $P_{магн1}$ . Механическая мощность  $P_{2мех}$  обеспечивает перемещение рабочей среды с заданными параметрами напора и производительности, а тепловая  $P_{2тепл}$  — её нагрев до требуемой температуры. В установившихся режимах работы при скорости вращения исполнительного элемента, близкой к синхронной ( $n_1$ ), тепловые параметры ПЭП будут определяться, главным образом параметрами неподвижного нагревательного элемента, в то время как исполнительный отразит производительность (расход) и давление (напор).

Перекачивающие электромеханические преобразователи конструктивно объединяют приводные, передаточные и исполнительные механизмы и при этом не имеют механических трансмиссий, редукторов, мультипликаторов, вариаторов и уплотнений. Совмещение выполняемых ими функций без ухудшения эксплуатационных характеристик делает их перспективными при реконструкции и замене существующего оборудования.

Анализ научных источников [4–8] показывает, что основные исследования ПЭП направлены на комплексное обеспечение их эксплуатационной надёжности, а вопросы проектирования и оптимизации па-

раметров непосредственно исполнительных элементов (ИЭ) преобразователей остаются на втором плане из-за отсутствия адекватных математических моделей процессов массопереноса при взаимосвязанном учёте электромагнитных, гидравлических, тепловых, механических воздействий.

## АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Параметризация исполнительных элементов, позволяющая установить их основные геометрические соотношения, предполагает несколько этапов:

1. Предварительное определение конфигураций и объёмов зон с различными типами течения жидкости на основе теории пограничного слоя.

2. Параметризация модели, одновременно обеспечивающей точность отображения тепловых и гидравлических процессов и ограничивающей сложность математических представлений, необходимых для её анализа.

3. Построение трёхмерной геометрической твёрдотельной параметрической модели.

4. Задание начальных и граничных условий, ограничений-равенств, ограничительных-неравенств, критериев оптимизации.

5. Обеспечение возможности организации итерационного вычислительного эксперимента на основе экспертных оценок субоптимальных параметров исполнительного элемента.

6. Проведение вычислительного эксперимента на базе виртуальной трёхмерной модели.

7. Определение весовых коэффициентов проектных параметров.

8. Проверка адекватности модели сравнением результатов вычислительного и натурального экспериментов.

Анализ гидродинамических условий применительно к исполнительным элементам ПЭП показывает, что априорное задание точных начальных и граничных условий невозможно из-за сложности распределения элементов потока перекачиваемой среды, обусловленной неравномерностью профиля скоростей потока, его турбулентностью, образованием неучитываемых разрывных течений, застойных зон, циркуляций, температурных градиентов и свя-

занных с ними течений, междуфазовыми процессами тепломассообмена.

Параметризация исполнительного элемента может быть выполнена с использованием смешанной модели, описывающей совокупность взаимосвязанных областей потока с различными характеристиками [9–11]. Модель применима как для простых идеализированных режимов течения (смещения, вытеснения, вытеснения с диффузией), так и для сложных (частично несмешиваемых, обратно-циркуляционных, струйных потоков). Основное условие применения модели идеального смешивания – требуемая интенсивность перемешивания обеспечивается автоматически вследствие наличия вращающегося исполнительного элемента. Модель идеального вытеснения предполагает поршневой характер течения среды и отсутствие перемешивания потока. При этом время движения среды определяется отношением объёма внутреннего канала ПЭП к объёмному расходу, как в трубчатых теплообменных аппаратах при турбулентном течении жидкости с равномерным профилем скорости.

Идентификация характерных целевых областей тепломассообмена, показанная на рис. 3, произведена на основе анализа процессов идеального смешивания (интенсивность циркуляции потока приводит к равномерному перемешиванию поступающей и находящейся в канале среды с радиальной скоростью  $\bar{v}_r$ ) и идеального вытеснения (поток состоит из равномерно движущихся с одинаковой осевой скоростью  $\bar{v}_z$  частиц перемещаемой среды).

Смешанная модель позволяет рассматривать два условно независимых процесса: нагрев и перемещение среды, причём процесс перемещения является определяющим как интенсивность теплоотвода от стенки канала, так и производительность ПЭП.

## ВЫБОР ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЭ

Предварительный выбор основных проектных параметров исполнительного элемента, характеризующих процесс массопереноса в ПЭП, может быть сделан с помощью модели идеализированного однофазного и одноступенчатого источника

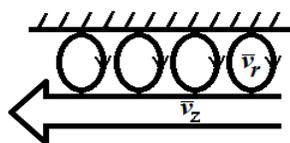


Рис. 3. Комбинированная модель тепломассообмена.

механической мощности, имеющего бесконечно большое число плоских лопастей единичной толщины, перемещающих физическую среду. Такая модель соответствует конструкции в виде совокупности двух статических торцевых колец, соединяющих напорные лопасти, с переменным числом лопастей, вариацией геометрических размеров и углов входа/выхода потока.

На этом этапе главенствует методика определения скоростей однотипных технических устройств для перемещения жидкости и газов, основанная на использовании уравнения Эйлера, позволяющего рассчитать напорные характеристики лопастного устройства по известному распределению скоростей в рабочем канале:

$$gH = u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $H$  – напор, м;  $u_1$  – тангенциальная скорость на входе лопасти, м/с;  $u_2$  – тангенциальная скорость на выходе элемента – лопасти ИЭ, м/с;  $v_{1u}$  – тангенциальная составляющая абсолютной скорости на входе, м/с;  $v_{2u}$  – тангенциальная составляющая абсолютной скорости на выходе, м/с.

Для перехода к реальному элементу необходимо учесть:

- число лопастей ИЭ, которое зависит от функционального назначения ПЭП (низко-, средне-, высоконапорное) и составляет для низконапорных устройств не более 10–12;

- проектные параметры: наружный диаметр ИЭ –  $d$ ; длина ИЭ –  $l$ ; толщина ИЭ –  $t$ ; количество колец ИЭ –  $n_k$ ; количество рёбер ИЭ –  $n_p$ ; ширина кольца ИЭ –  $w_k$ ; ширина ребра ИЭ –  $w_p$ ; длина лопасти –  $l_n$ ; толщина лопасти –  $t_n$ ; высота лопасти –  $h_n$ ; количество лопастей –  $n_n$ ; угол установки лопасти –  $\alpha$ ; диаметр внутреннего ферромагнитопровода (ФМ) –  $d_\phi$ ; длина ФМ –  $l_\phi$ ; толщина ФМ –  $t_\phi$  (рис. 4);

- объёмные, гидравлические и механические потери.



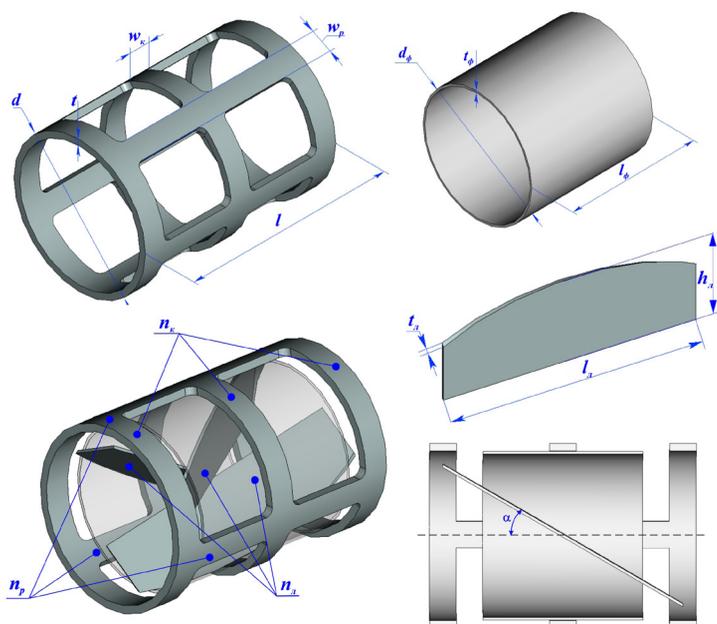


Рис. 4. К выбору проектных параметров ИЭ ПЭП.

### СОЗДАНИЕ 3D-МОДЕЛИ

Предварительный выбор проектных параметров ИЭ позволяет перейти к этапу создания трёхмерной твёрдотельной параметрической модели ИЭ. Отсутствие априорной информации о значимости отдельных параметров обуславливает необходимость исследования и оценки их влияния на его выходные характеристики на основе теории планирования эксперимента.

Нахождение субоптимального варианта ИЭ требует создания его гибкой вариативной геометрической модели. Эта задача решается с использованием технологии параметризации на базе системы автоматизированного проектирования T-FLEX CAD.

Реализация проекта параметрической 3D-модели начинается с 3D-фрагментов отдельных деталей ИЭ. Процесс моделирования разбивается на два этапа:

1. Создание геометрии проектируемого объекта (построение профилей, выполнение операций 3D-моделирования, позиционирование деталей в сборочной модели).
2. Задание параметров проектируемого объекта (линейные, угловые размеры, количество элементов) и их значений (чисел, переменных, выражений).

Модель сборочной единицы «исполнительный элемент» включает фрагменты: корпус ИЭ, ферромагнитопровод, лопасть и позволяет реализовать в T-FLEX CAD возможность управления геометрической

формой элементов сборки. Передача значений параметров выполняется при помощи внешних переменных фрагмента (например, диаметр, длина, толщина корпуса ИЭ, диаметр, длина, толщина ФМ, длина, высота лопасти); количеством элементов сборки (например, количеством рёбер и колец корпуса ИЭ, количеством лопастей); положением элементов сборки (например, углом наклона лопастей).

Проектные параметры при параметризации элементов сборочной модели ИЭ делятся на две группы. К группе основных переменных относятся: наружный диаметр —  $d$ ; длина —  $l$ ; толщина —  $t$ ; количество колец —  $n_k$ ; количество рёбер —  $n_p$ ; ширина кольца —  $w_k$ ; ширина ребра ИЭ —  $w_p$ . В группу вспомогательных переменных корпуса ИЭ входят: угол кармана —  $alfa\_karm$  и длина выталкивания —  $dl\_vyt$ .

При формировании трёхмерной сборочной параметрической модели ИЭ обеспечивается связь внешних переменных деталей (3D-фрагментов) с переменными сборочной единицы. Таким образом, параметры сборочной единицы автоматически изменяют параметры 3D-фрагментов в зависимости от значений входных данных. Параметризация позволяет получить различные конструктивные варианты ИЭ и перейти к оценке влияния размерных соотношений на процесс теплообмена в целевых областях.

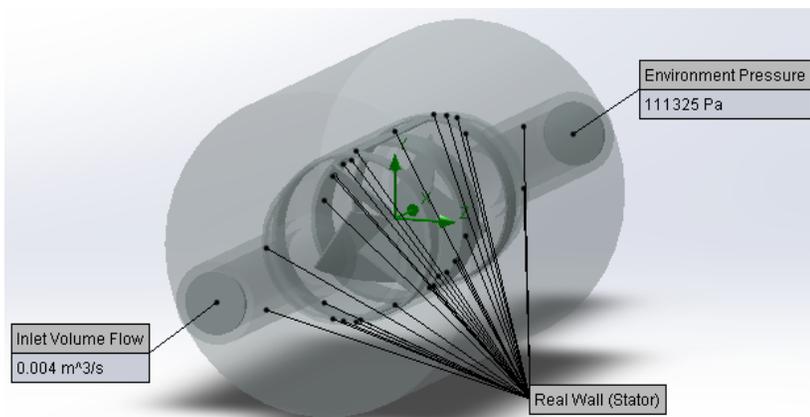


Рис. 5. Задание граничных условий.

## ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ И УСЛОВИЯ-ОГРАНИЧЕНИЯ

Факторы, ограничивающие выбор значений параметров ИЭ, определяются совокупностью процессов, протекающих в ПЭП, и его конструктивными особенностями. Анализ процессов тепломассопереноса показывает, что критериями выбора параметров могут служить:

- для электромагнитных процессов — допустимая плотность тока и допустимое значение индукции в элементах магнитной цепи, определяемые с учётом условий теплообмена с рабочей средой;
- для механических процессов — предел прочности элементов конструкции в статических и динамических режимах;
- для гидравлических процессов — минимальное гидравлическое сопротивление, создаваемое исполнительным элементом;
- для тепловых процессов — обеспечение допустимых значений температуры рабочей среды на выходе канала.

В качестве граничных условий задаются входной объёмный расход (Inlet Volume Flow 0,004 м³/с) и давление на выходе (Environment Pressure 111325 Па), для канала (Stator) граничное условие — Real Wall (рис. 5).

Исходя из конфигурации областей моделирования и рекомендаций, приведённых в [1], можно ограничить диапазоны варьирования отдельных параметров ИЭ.

Так, наружный диаметр и длина ИЭ выбираются из условий:

$$d < D_1; l < l_1,$$

где  $D_1$ ,  $l_1$  — внутренний диаметр и длина канала.

Толщина ИЭ определяется условиями минимального гидравлического сопротив-

ления и необходимой механической прочности:

$$0 < t \leq k_n \cdot t_{\text{доп}},$$

где  $k_n$  — коэффициент надёжности, учитывающий конструктивные особенности и технологию производства ИЭ, принимаемый по общемашиностроительным методикам и составляющий 1,1–1,2 для сплошного цилиндра;  $t_{\text{доп}}$  — минимальная толщина ИЭ, получаемая с учётом пределов механической прочности.

Количество торцевых колец ИЭ принимается  $n_k = 2$ , исходя из условия замыкания вторичного тока ПЭП. При необходимости повышения механической прочности ИЭ и обеспечения возможности размещения напорных лопастей  $n_k$  может быть увеличено, но это не должно приводить к ухудшению условий теплообмена при движении рабочей среды относительно стенки канала.

Ширина рёбер  $w_p$  и колец  $w_k$  ИЭ выбираются по допустимой плотности тока в условиях вынужденной конвекции, с учётом механических нагрузок и по результатам гидравлического расчёта.

Количество рёбер  $n_p$  выбирается из условия:

$$n_p = \frac{M_2}{(l - 2w_k)w_p t \cdot \sigma_{\text{доп}}},$$

где  $M_2$  — вращающий момент, приложенный к ИЭ;  $\sigma_{\text{доп}}$  — допустимый предел прочности материала.

Длина лопасти  $l_l$  ограничивается величиной угла установки  $\alpha$  и внутренним диаметром ФМ и выбирается в диапазоне  $0 < l_l \leq l_{l,\text{max}}$ .



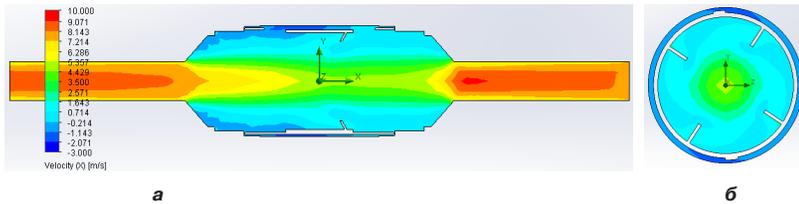


Рис. 6. Визуализация результата расчёта поля скоростей в продольном (а) и поперечном сечении (б) канала.

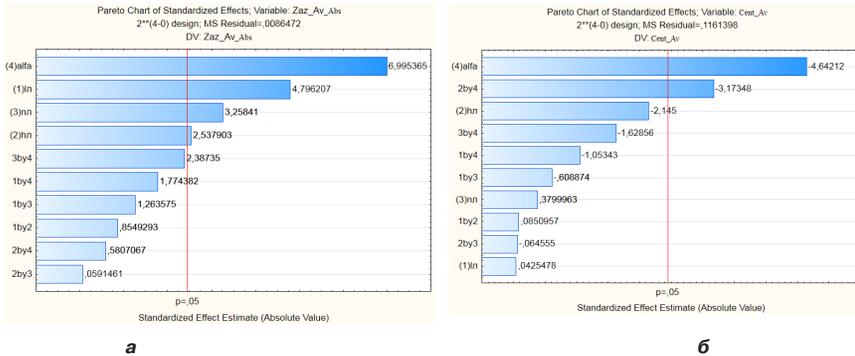


Рис. 7. Диаграммы Парето.

Диапазон вариации угла установки лопасти  $\alpha - 0-45^\circ$ .

Толщина лопасти выбирается в соответствии с минимальным гидравлическим сопротивлением и необходимой механической прочностью:

$$0 < t_{л} \leq k_n \cdot t_{доп},$$

где  $t_{доп}$  – минимальная толщина лопасти, получаемая с учётом пределов прочности материала и результатов механического расчёта лопасти.

Высота лопасти ограничивается внутренним диаметром ФМ  $h_{л} < 0,5d_{\phi}$ .

Наружный диаметр и длина ФМ должны удовлетворять условиям  $d_{\phi} < d - t; 0 < l_{\phi} < l - 2w_{к}$ .

Толщина внутреннего ферромагнитопровода, определяющая его внутренний диаметр и соответственно гидравлическое сопротивление проточной части, предварительно выбирается равной минимальной ширине зуба статора  $t_{\phi} = b_{\zeta}$ .

Минимальное количество лопастей выбирается из условия симметрии  $n_{л} \geq 2$ .

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ

Процесс моделирования перемещения рабочей среды визуализируется в виде поля скоростей с использованием CFD (computational fluid dynamics) технологий

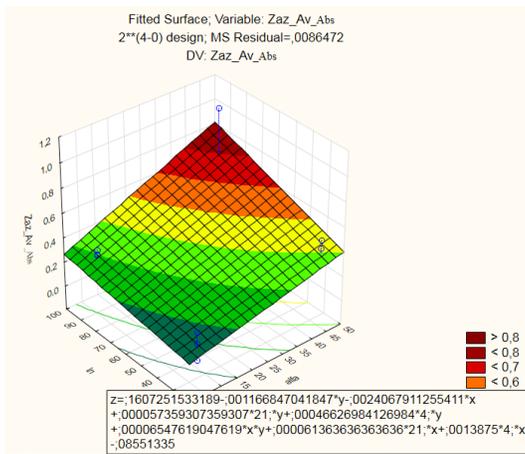
на базе модуля Flow Simulation системы SolidWorks [12]. Вариация геометрии ИЭ осуществляется автоматически программой для параметрического моделирования. Значения параметров определяются исходя из плана полнофакторного эксперимента. Количество получаемых файлов соответствует числу опытов в плане эксперимента. Файлы параметров используются при обновлении геометрической модели ИЭ.

Пример результатов расчёта поля скоростей в продольном (а) и поперечном сечении (б) для целевой зоны идеального вытеснения канала показан на рис. 6.

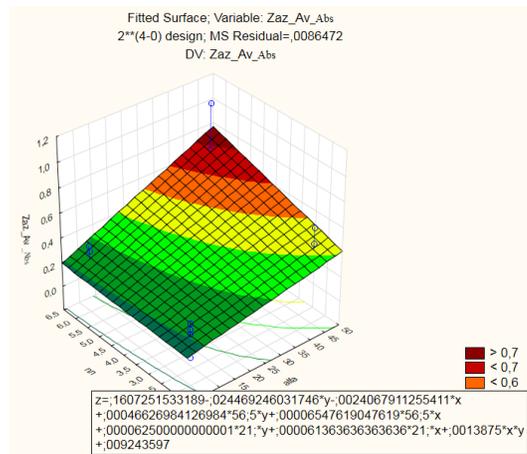
Для предварительной оценки влияния проектных параметров ИЭ на среднюю скорость перемещения среды берётся средневзвешенное значение скорости по графическому отображению поля скоростей.

На основании диаграмм Парето определяются значимые факторы: для целевой зоны идеального смешивания – угол установки лопасти  $\alpha$ , длина лопасти  $l_{л}$ , количество лопастей  $n_{л}$ , высота лопасти  $h_{л}$  (рис. 7а); для целевой зоны идеального вытеснения – угол установки лопасти  $\alpha$  и совместное влияние  $\alpha$  и  $h_{л}$  (рис. 7б).

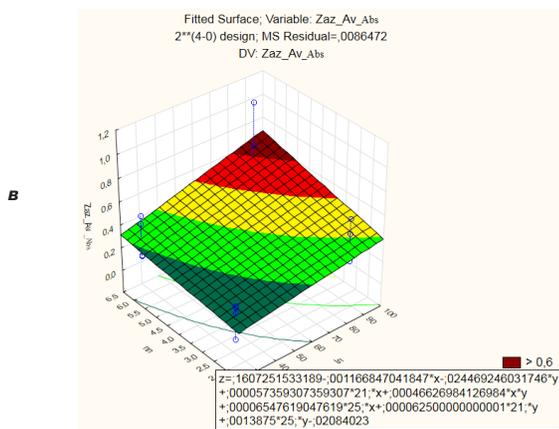
На рис. 8а,б,в показаны поверхности отклика для значимых факторов  $\alpha$ ,  $l_{л}$ ,  $n_{л}$  в целевой зоне идеального смешивания.



а



б



в

**Рис. 8.**  
Поверхности отклика для значимых проектных параметров.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗНАЧИМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Представленные в виде поверхностей отклика на рис. 8 результаты моделирования позволяют провести анализ влияния значимых проектных параметров на величину осевой составляющей скорости перемещения рабочей среды.

Основной значимый параметр – высота лопасти  $h_d$ , нелинейно связанная с осевой составляющей  $Cent_{Av}$  (рис. 9, построен для доверительного интервала).

Начальное увеличение скорости объясняется увеличением площади лопастей и незначительным перекрытием лопастями центра рабочего канала. Выбор значений  $h_d$ , превышающих критическое значение (18 мм), приводит к уменьшению скорости и снижению производительности ПЭП.

Следующим по значимости является угол установки лопасти  $\alpha$ , одновременно влияющий на процессы теплообмена, что не позволяет его использовать для

раздельного управления выходными параметрами преобразователя.

В меньшей степени на процесс массообмена влияет длина лопасти  $l_d$ , которая оказывается третьим по значимости параметром.

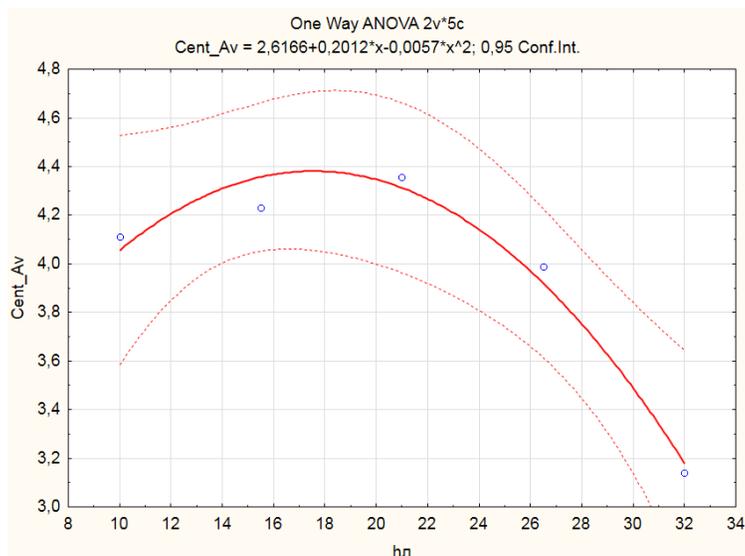
Количество лопастей  $n_d$  на основном этапе исследований оказалось незначимым, однако при дальнейшем моделировании совместный учёт количества лопастей и угла наклона лопасти  $n_d + \alpha$  сделал параметр пятым по значимости. При угле установки  $45^\circ$  количество лопастей  $n_d$  стало четвёртым в параметрическом рейтинге.

Толщина корпуса ИЭ  $t$  оказалась наиболее значимым параметром для зоны идеального смешивания, в которой параметр  $t$  и осевая составляющая скорости обратно коррелированы.

В целом анализ влияния значимых параметров показывает, что для раздельного управления можно использовать: в зоне идеального смешивания –  $t, l_d, n_d$ , в зоне идеального вытеснения –  $h_d$ .



**Рис. 9. Зависимость осевой составляющей скорости рабочей среды от высоты лопасти.**



## ВЫВОДЫ

1. Область исследования перекачивающих электромеханических преобразователей может быть представлена двумя несвязанными подобластями: идеального смешивания и идеального вытеснения.

2. Осевая составляющая скорости в канале является функционалом для определения производительности преобразователя и его теплового состояния.

3. Априорно основными проектными параметрами исполнительного элемента выступают его наружный диаметр, длина и толщина, количество и ширина колец и рёбер, длина, толщина, высота, угол установки и количество лопастей, размеры внутреннего ферромагнитопровода.

4. Параметры исполнительного элемента по значимости распределены следующим образом: высота лопасти, угол её установки, длина лопасти, количество лопастей, толщина корпуса.

5. Независимое управление процессом теплопередачи обеспечивают параметры —  $t$ ,  $l_d$ ,  $n_d$ , процессом перемещения —  $h_d$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kim K. K., Karpova N. S., Prichodchenko O. V. Analysis of the influence of design factors on the winding reliability of heating electromechanical transducers // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2013. — Вып. 2. — С. 26–31.

2. Kim K. K., Иванов С. Н., Шпилев М. А., Ткачук А. А., Кулиниченко Н. Ю. Энергосберегающая система электроотопления // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2013. — Вып. 1. — С. 84–89.

3. Kim K. K., Мартыанов М. В., Иванов С. Н., Просолович А. А. Постановка задачи исследования устойчивости теплоотвода в элементах герметичных электромеханических преобразователей // Учёные записки КНАГТУ. — 2015. — № III-1. — С. 26–31.

4. Kim K. K., Иванов С. Н. Некоторые вопросы определения показателей надёжности теплогенерирующих электромеханических преобразователей // Известия вузов. Электромеханика. — 2008. — № 6 — С. 13–17.

5. Иванов С. Н. Проектирование элементов электротехнических комплексов для систем отопления транспортного назначения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2010. — Вып. 3. — С. 105–114.

6. Иванов С. Н., Kim K. K., Голоколос Д. А., Карпова Н. С. Анализ влияния конструктивных факторов на надёжность герметичных электромеханических преобразователей // Учёные записки КНАГТУ — 2013. — № IV-1. — С. 29–34.

7. Иванов С. Н., Уханов С. В. Определение параметров теплогенерирующих электромеханических преобразователей // Энергоснабжение и водоподготовка. — 2009. — № 1. — С. 56–61.

8. Иванов С. Н., Kim K. K., Уханов С. В. Основы проектирования гидроэлектродинамических теплогенераторов // Электро. — 2008. — № 4. — С. 14–16.

9. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: Учебник. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1975. — 488 с.

10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: Пер. с нем. — М.: Наука, 1974. — 712 с.

11. Деменок С. Л. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах и каналах: Монография. — СПб.: Н-ПромБюро, 2012. — 304 с.

12. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 448 с. ●

Координаты авторов: **Ким К. К.** — kimkk@inbox.ru, **Просолович А. А.** — prosolovich.aa@email.knastu.ru, **Колошенко Ю. Б.** — koloshenko.yb@email.knastu.ru.

Статья поступила в редакцию 12.07.2017, принята к публикации 06.10.2017.