

DOI:10.18287/2409-4579-2018-4-2-43-53

УДК: 532.555.2

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ  
ЖИДКОСТИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ  
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ С ВЕРИФИКАЦИЕЙ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СТЕНДЕ**

**Э.Г. Берестовицкий,  
Н.В. Пялов,  
М.В. Соловьев**

АО «Концерн «НПО «Аврора»  
Карбышева, 15,  
г. Санкт-Петербург,  
Российская Федерация,  
196024  
[mail@avrorasystems.com](mailto:mail@avrorasystems.com)  
<http://www.avrorasystems.com>

*В системах управления расходом питательной воды (СУ РПВ) в парогенератор на современных изделиях и изделиях нового поколения требования по виброшумовым характеристикам (ВШХ) и гидродинамическому шуму (ГДШ) значительно повышены. В настоящее время регулирующие органы (РО) удовлетворяют требованиям нормативных документов по виброшумовым характеристикам (ВШХ) 80-х годов.*

*Для решения задачи на соответствия современным требованиям ранее широко использовалась плоская постановка задачи, которая не дает полной и адекватной картины физических полей электрогидравлической аппаратуры. Поэтому постепенно необходимо усложнять задачу и переходить в трехмерную область.*

*Проделана совместная работа с рядом расчетных компаний дистрибьюторов и производителей кодов вычислительной гидродинамики (ВГД, в зарубежной литературе CFD) с целью определения путей повышения акустического качества наших изделий путем трехмерного математического моделирования с получением параметров физических полей с последующей верификацией.*

*Верификация производилась по расчетной величине расхода в положениях протечки и полного открытия и значениях полученных на стенде при испытаниях изготовленного макета. Расхождение математического моделирования с экспериментом не превысило 5%.*

**Ключевые слова:** ВШХ; ГДШ; вибрация; арматура; питательная вода; регуляторы; рабочие органы; дроссели; парогенератор; малошумность; сетчатые экраны; глушители

## 1 Введение

Современные требования к основным техническим характеристикам промышленных изделий для гражданского и военного судостроения требуют серьезных научно-технических исследований и предполагают использование развитого математического аппарата, а также многократного макетирования.

Основные технические характеристики, которые необходимо обеспечить посредством ММ: требования по ТТЗ: протечки, расходная характеристика, усилия, прочностные характеристики, электромагнитные и электромеханические характеристики различных разрабатываемых устройств входящих в состав изделий.

Определение акустического качества построения схемы и конструкции прибора как в статическом, так и в перспективе в динамическом режимах, - является трудоемкой, наукоемкой и ресурсоемкой задачей.

Еще в 1980-х годах прошлого столетия необходимая точность математического вычисления достигла того уровня, когда стала очевидна необходимость использования специальных средств – электронно-вычислительных машин (ЭВМ) – для решения сложных нелинейных систем дифференциальных уравнений. Параллельно с ЭВМ развивались различные теории, методы вычислений (метод конечных элементов – МКЭ) и программные коды (Fortran, C++ и другие). Они позволяли

получать параметры физических полей с приемлемой для каждого этапа развития точностью. Постепенно появлялись и средства визуализации полученных результатов.

В настоящее время компании, занимающиеся разработкой и производством электрогидравлических приборов, активно внедряют в процесс проектирования методы вычислительной гидродинамики (ВГД, в иностранной литературе CFD). Список задач, решаемых методами ВГД, постоянно расширяется. Появляются новые модели для более точного описания физических явлений, совершенствуются численные методы, растет производительность вычислительной техники. Одной из прикладных задач ВГД является моделирование турбулентного течения в пристеночной зоне.

В виду ограниченности вычислительных ресурсов и отсутствия адекватных моделей реализованных в современных программных комплексах, решение задачи производится в двухмерной постановке задачи. Такое решение предполагает ряд значительных упрощений, что сказывается и на получаемых результатах.

С целью оценить возможности реализации трехмерной постановки задачи нами, совместно с разработчиками и центрами компетенции наиболее известных в России программных комплексов (ПК) математического моделирования, были произведены тестовые решения задач с последующей верификацией полученных при ММ результатов на стенде.

## 2 Теоретические исследования

Для оценки результатов необходимо правильно учесть множество факторов и теоретических выкладок в области изучения течений и их акустических моделей: теория пограничного слоя Шлихтинга [1], разработанные ЦАГИ модели дозвуковых турбулентных струй [2], модели распространения звука в различных средах Лайтхилла [3], общие для механики

жидкости и газа модели описания течений и др. При этом надо учитывать специфику реализации ПК вычислительной гидродинамики (ВГД).

Развитый математический аппарат струйных течений представлен в работах Биркгофа Г., Сарантелло Е. [4] Широта охвата и обобщения знаний в области звукоизлучения струй и математическом описании течений струй приводится в работах отечественных ученых Гуревича М.И., Степанова Г.Ю. [5]. Математическое описание акустических явлений при рассмотрении динамики ЭГП представлен в работах Гликмана Б.Ф. [6]. Работа Гликмана Б.Ф. позволяет рассматривать задачу акустического качества построения проточных частей электрогидравлических приборов (ЭГП) на стыке наук: теории управления, акустики и механики жидкости и газа.

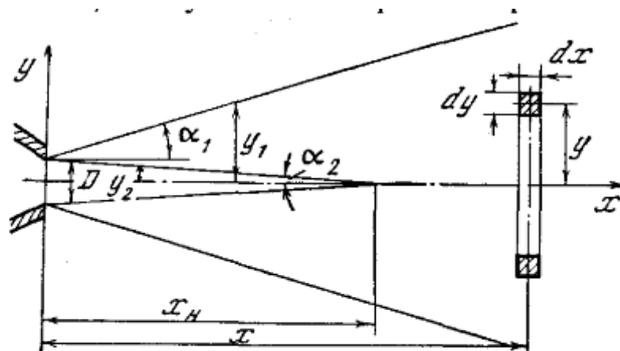
Эффекты кавитации, влияющие на акустические характеристики, рассматриваются в применении к проточным частям ЭГП рассчитанных на большие расходы в работах Сарафанова И.А. [7], в которых содержится огромный массив эмпирических данных.

В работах Берестовицкого Э.Г. [8] представлен ряд эффективных решений для улучшения виброакустических характеристик и гидродинамических характеристик проточных частей ЭГП, полученных в результате многолетнего опыта эксплуатации стендового оборудования и ЭГП систем управления.

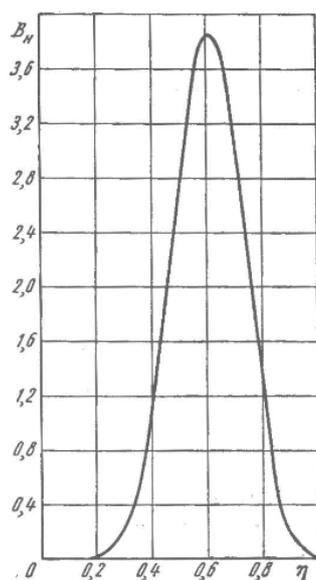
В работе [9] рассматривалось применение теории свободных турбулентных струй. Использование теории затопленных турбулентных дозвуковых струй показало, что спектральное распределение частот гидродинамического шума напрямую и в значительной степени определяется именно спектром и взаимодействием струй, образующихся при протекании рабочей жидкости через сетчатые экраны и отверстия в дросселирующем сечении. При этом параметризация и оптимизация проточных частей с этой точки зрения возможна

посредством проведения множества натуральных испытаний. С целью повышения качества параметризации и оптимизации средств шумогашения мы рассматриваем применение ПК ВГД.

В работе [10] используются основные положения теории Лайтхилла и полагается, что каждый элементарный объем струи является широкополосным источником шума, характерная частота которого пропорциональна отношению скорости к масштабу турбулентности, получены выражения для определения звуковой мощности затопленной струи в целом, ее начального и основного участков, а также для спектральных характеристик шума этих участков и объемов.



а



б

Рисунок 1. Турбулентная дозвуковая затопленная струя и распределение мощности струи на начальном участке [2]

Из рисунка 1 видно, что в начальном участке струи максимум шума излучается цилиндрическим кольцом радиусом, равным радиусу сопла, образующая которого расположена на линии, проходящей через кромку сопла. Следует отметить, что распределение интенсивности турбулентности по радиусу также имеет форму кривой с максимумом в области линии, проходящей через кромку сопла параллельно оси струи.

Частота звука зависит от скорости истечения струи и от расположения рассматриваемого объема, излучающего звук.

Турбулизаторы-экраны позволяют управлять спектром звуковой мощности струи путем рационального подбора местоположения экрана в струе, режима истечения и относительного живого сечения. Задача об акустическом взаимодействии струи с экраном сводится к определению звуковой мощности участка струи от среза сопла до экрана  $W_1$  и участка струи, образующейся за экраном  $W_2$ , а также за счет обтекания остова экрана турбулентным потоком  $W_3$ :

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (1)$$

В выражение (1) интенсивность и спектр звуковой мощности конечных участков и всей струи вычисляются по приведенным в работе [2] формулам. Шум обтекания определяется на основании полученных экспериментальных данных. На рисунке 2 видно хорошее совпадение. Таким образом, предложенный в работе [2] метод расчета может быть использован при решении различных задач излучения шума турбулентных струй.

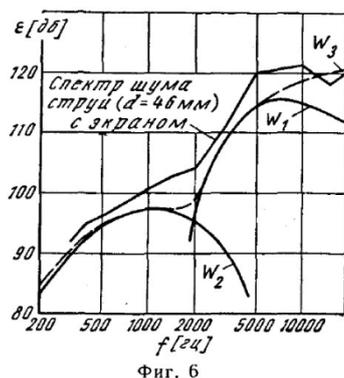


Рисунок 2. Спектр шума струи диаметром 46 мм с экраном [2]

### 3 Конструктивные мероприятия по снижению уровня ГДШ

В применении к нашей тематике перечисленных принципов рассмотрим ЭПП разработки ЦРИЭГА. В таблице 1 представлено описание сетчатого экрана (СЭ):

- Основными параметрами СЭ являются:

  - 1 Площадь проходного сечения экрана.
  - 2 Геометрические параметры экрана.
  - 3 Расстояние от экрана.
  - 4 Скорость струи.

Таблица 1 –Снижение шума струи: СЭ [10]

Метод воздействия	Снижение шума	Преимущества
СЭ перпендикулярно истечению струи	5 дБ в среднем.	Снижение шума на низких частотах.

Недостатками использования СЭ являются:

- усиление шума на высоких частотах, обусловленного шумом обтекания остова сетчатого экрана;
- более эффективно в сочетании с другими методами борьбы с шумом;
- приводит к потерям импульса турбулентной струи.

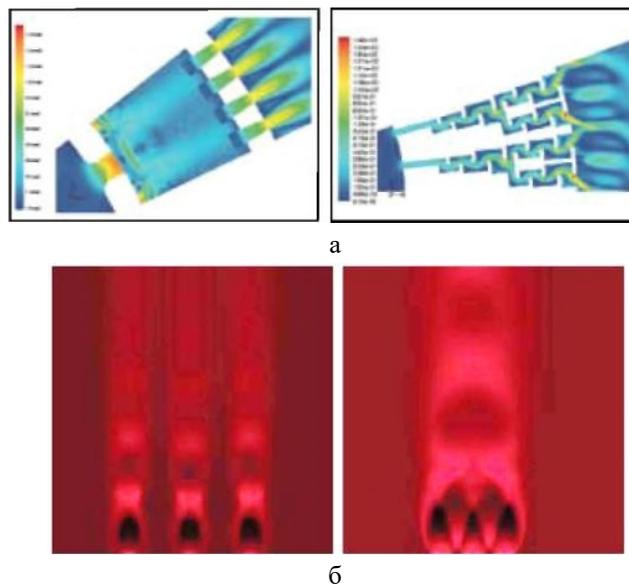


Рисунок 3. Использование ПК ВГД в плоской постановке компаниями Fisher и Emerson [11]

На данный момент существует множество примеров использования ПК ВГД в плоской постановке задачи для получения физических параметров полей течений с разбиением потока на струи. Компаниями Fisher и Emerson – одними из основных лидеров в области производства малошумных ЭПП – рассматривались как разбиение потока на струи (рисунок 3а), так и влияние взаимодействия струй на спектр ГДШ (рисунок 3б).

В результате исследований и на основании теоретических предпосылок, нами был разработан макет двухкаскадной проточной части прибора (рисунок 4), с использованием сетчатых экранов. На выходе из проходов струйки сталкиваются, при этом теряется часть кинетической энергии. Скорость потока на выходе меньше, чем у обычного РО с единым потоком. Все это уменьшает шум, вибрацию и предохраняет от возникновения кавитации. На рисунке 4а-в показаны изображения 3D-модели и натурального образца соответственно.

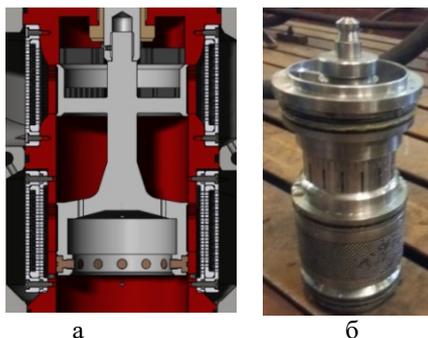
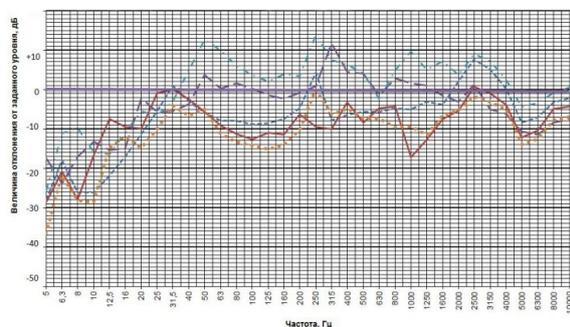


Рисунок 4. Проточная часть макета ЭГП

На рисунке 5 показаны превышения уровня шума относительно современных требований по ГДШ. Характеристики были получены по результатам испытаний макета проточной части макета ЭГП с различными диссипативными элементами в проточной части и без их использования.

Как видно из рисунка 5, нами были получены положительные результаты по ГДШ. Стоит отметить, что прибор на стенде испытывался совместно с глушителями гидродинамического шума (ГГШ), поэтому дальнейшее совершенствование заключается в исключение их схемы ГГШ по экономическим и технологическим причинам.



— — а) ПК DN 100 с ГГШ с ДЭ 2 ступень резина — б) ПК DN 100 с ГГШ с ДЭ 2 ступень резина  
 - · - в) ПК DN 100 с ГГШ с ДЭ 2 ступень резина - · - г) ПК DN 100 с ГГШ с ДЭ 2 ступень резина  
 - · - · - д) ПК DN 100 с ГГШ с ДЭ без резины

Рисунок 5. Превышение требований по ГДШ макета ЭГП с ГГШ с ДЭ с резиной на второй ступени и без нее

Для дальнейшего совершенствования ЭГП было необходимо перейти к трехмерной постановке задачи в ПК ВГД, что было затруднено рядом причин (значительный объем вычислительных ресурсов, сложности построения сетки или невозможность построения сетки в случае наличия сетчатых экранов в проточной части и др.).

Поэтому, было проведено тестирование различных ПК ВГД на решение задач в трехмерной постановке для проточных частей при наличии малых зазоров с дальнейшей верификацией полученных данных на стенде.

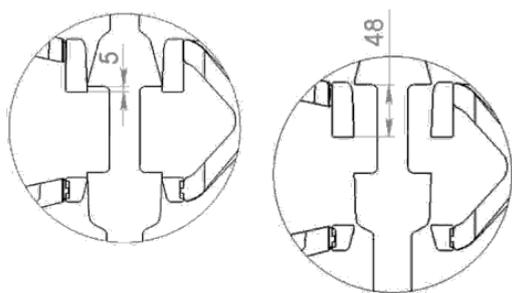
#### 4 Математическое моделирование течения жидкости через ЭГП

При заданных в таблице 2 параметрах расчетом было выполнено определение расхода рабочей среды через регулирующийся клапан и гидродинамических параметров течения при полном открытии дросселя.

Таблица 2. Принятые параметры для расчета

№	Параметр	ANSYS FLUENT	Flow Vision	ЛОГОС
1	Перепад давления на клапане, МПа	0,3	0,22	0,22
2	Давление на выходе, МПа	3	1	1
3	Рабочая среда	Вода дистиллированная		
4	Температура рабочей среды, °С	30		
5	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	997	997	998
6	Вязкость, 10 <sup>4</sup> Па с	8,7	8,2	8,9

Расчеты выполнили: ANSYS FLUENT - ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс»; FlowVision - ООО «ТЕСИС»; ЛОГОС - ФГУП РФЯЦ - ВНИИЭФ.



а



б

Рисунок 6. Геометрическая модель регулирующего клапана

Геометрическая модель корпуса регулирующего клапана в виде твердотельной геометрической модели показана на рисунке 6а и б.

#### 4.1 ПК ANSYS FLUENT

В «ANSYS FLUENT» был выполнен гидродинамический расчет регулирующего клапана в положении полного открытия.

В работе проводилось численное моделирование регулирующего клапана с целью определения его гидродинамических характеристик в трехмерной постановке. Моделирование было выполнено с подключением модели турбулентности k-ε, пристеночной функции Enhanced Wall Treatment и акустической модели Broadband Noise Source.

Расчетная область течения разбивается на конечно-объемную расчетную сетку. В модуле ANSYS Fluent Meshing, производится построение неструктурированной полиэдрической сетки с пристеночной областью из 124 призматических слоев.

Картина распределения координаты  $y^+$  показана на рисунке 7.

Общий размер сгенерированной расчетной сетки составляет 4,1 млн. ячеек, значения безразмерного расстояния от стенки  $y^+$  достигает 135, что находится в пределах границ применимости используемой в расчете модели турбулентности.

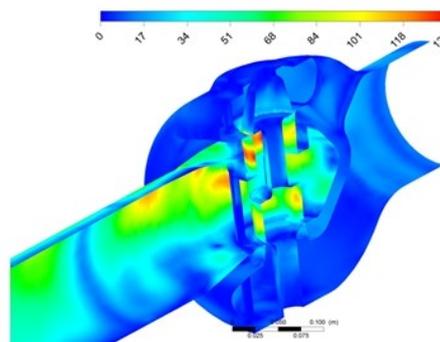


Рисунок 7. Распределение безразмерной координаты  $y^+$  на внутренней поверхности регулирующего клапана

После решения гидродинамической задачи, был произведен акустический расчет на основании полученных данных об интенсивности турбулентных пульсаций. Расчет позволил судить о качественной картине распределение акустической мощности широкополосного шума в регулирующем клапане. После произведенного расчета были выявлены области, имеющие наибольшую интенсивность акустического шума.

В результате расчетов определены значение объемного расхода рабочей среды и значение кавитационного запаса на расчетном режиме работы, а также получено распределение акустической мощности внутри регулирующего клапана.

#### 4.2 ПК FlowVision

Задача решалась в трехмерной постановке. Расчетная схема: неявная. Размер шага по времени:  $CFL = 100$ . Модель турбулентности: KEFV (k-epsilon FlowVision), равновесные пристеночные

функции. Для построения сетки использовалась модель зазора. Граничные условия согласно таблице 2.

Было произведено исследование зависимости результатов от размера ячеек расчетной сетки.

Исследовалась сходимость в зависимости от размера ячеек сетки. Минимальный, полученный при помощи локальной адаптации размер ячейки 0,625 мм. Сетка с минимальным размером 0,625 мм может быть использована для основных расчетов. Критерий сходимости – массовый расход при открытом клапане или закрытом клапане.

Стоит отметить, что при решении задачи в ПК FlowVision использование локальной адаптации вместо сгущения начальной сетки позволяет значительно снизить количество расчетных ячеек при сохранении результата на том же уровне.

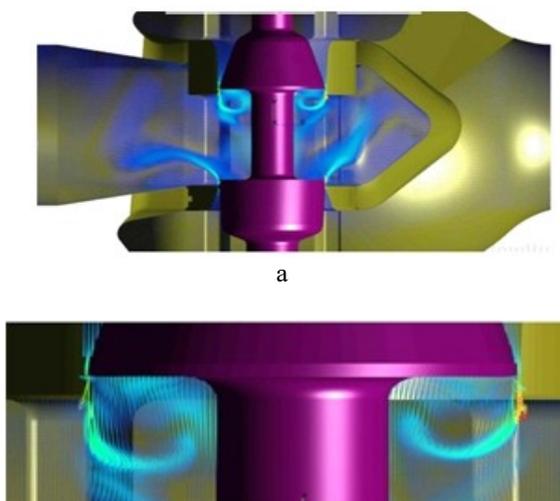


Рисунок 8. Распределение скоростей течения при полностью закрытом клапане

Расчетная сетка для финальных расчетов в трехмерной постановке имела следующие параметры: неравномерная начальная сетка с минимальным размером ячеек 2,5 мм и локальной адаптацией (сгущением) до размера ячейки 0,625 мм. Всего ячеек: 2,88 млн. шт.

Распределение скоростей при полностью закрытом клапане показано на рисунке 8а и б.

### 4.3 ПК ЛОГОС

При решении задачи в ПК ЛОГОС рассматривалось гидродинамическое течение в регулирующем клапане в положении «протечки».

На рисунке 9а и б приведены расчетные поля скорости и статического давления в различных сечениях. Также были получены линии тока и векторное поле скорости.

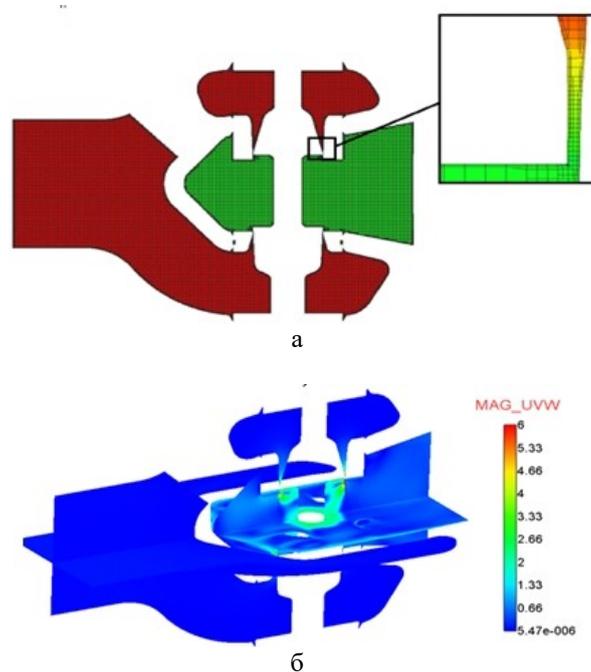


Рисунок 9. Внешний вид расчетной области и продольное сечение сеточной модели

Для представленной расчетной области была построена сеточная модель с призматическим пограничным слоем на основе сеточного генератора из усеченных гексаэдров. Сетка содержит порядка 6 млн. расчетных ячеек.

### 5 Экспериментальные исследования

Верификация результатов ММ и натурных экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Верификация полученных результатов

№	ПК	ММ, кг/с	Эксперимент, кг/с	Погрешность, %	Кол. ячеек, млн.
1	ANSYS Fluent	31,75	36,08	12	4,1
2	Flow Vision	29,13	30,9	5,7	2,88
		1,72	1,9	9,5	2,88
3	ЛОГОС	1,88	1,9	1	6

## 6 Выводы и рекомендации

В результате работ, благодаря использованию современных средств проектирования и учету данных по снижению шума затопленных турбулентных дозвуковых струй, нам удалось определить оптимальное с точки зрения акустики расположения отверстий и элементов проточных частей, а также их параметров. Это позволяет создавать компактные решения для малощумных ЭГП.

Отметим, что плоская постановка задачи не дает полной и адекватной картины физических полей ЭГП, поэтому дальнейшие пути развития лежат в исследовании трехмерной области. На данный момент работы в этом направлении продолжаются. О результатах будет доложено на следующих конференциях.

ПК ВГД обладают разным функционалом и степенью удобства использования, при этом можно справедливо рассматривать соотношение цена качество.

В ПК ANSYS FLUENT проведено численное моделирование гидродинамики регулирующего клапана в среде программного комплекса ANSYS FLUENT. Определены значение объемного расхода рабочей среды и значение кавитационного запаса, а также распределение акустической мощности. Для использования данного ПК ВГД для решения задач исследования течений в проточных частях ЭГП с несколькими сетчатыми экранами необходимо использовать языки

программирования для написания соответствующих модулей.

В ПК FlowVision благодаря использованию специальной «Модели зазора» возможно получение результатов для любой минимальной величины зазора на относительно грубых сетках. Это является основанием для постановки трехмерной задачи для исследования случая наличия сетчатых экранов и не структурированных множественных отверстий в проточной части.

Благодаря технологии «Подвижные тела» возможно моделирование переходных процессов, происходящих при движении запорного органа, что позволяет определить не только статическое качество проектирования, но и динамическое. Отметим, что акустическое качество в переходных режимах ранее при проектировании ЭГП не учитывалось.

ПК ЛОГОС обладает возможностями для определения ряда характеристик проточных частей с достаточно высокой точностью. Тем не менее, постановка трехмерной задачи взаимовлияния струй и их влияние на акустическую картину рассматриваемой проточной части на данный момент в ПК не предусмотрено.

## Список использованных источников

- [1] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. – 536 с.
- [2] Муни А. Г. Звуковая мощность, создаваемая участками дозвуковой струи / А.Г. Муни, З.Н. Науменко // Ученые записки ЦАГИ, 1970. - Том 1. - № 5. - С. 29 - 38.
- [3] Lighthill M. J. On sound generated aerodynamically: I. General theory / M. J. Lighthill // Proceedings of the Royal Society of London. – 1952. - Vol. 211, Issue 1107. – P. 564-587.
- [4] Биркгоф Г. Струи, следы и каверны / Г. Биркгоф, Э. Сарантонелло. - М.: Мир., 1964. – 467 с.
- [5] Гуревич М. И. Теория струй идеальной жидкости / М. И. Гуревич. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 713 с.
- [6] Гликман Б. Ф. Математически модели пневмогидравлических систем / Б. Ф. Гликман. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 368 с.

[7] Сарафанов И. А. Экспериментальные исследования и разработка методов расчета конструктивных параметров регулирующих органов корабельных систем автоматического регулирования ядерных пароэнергетических установок / И. А. Сарафанов. – СПб.: АО «Концерн «НПО «Аврора», 2016. - 404 с.

[8] Берестовицкий Э. Г. Снижение вибрации и шума гидравлических приборов систем управления техническими средствами / Э. Г. Берестовицкий, Ю. А. Гладилин, В. И. Голованов, И. А. Сарафанов. – СПб.: Астерион, 2008. – 316 с.

[9] Берестовицкий Э. Г. Математическое моделирование проточных частей органов регулирования САУ ТС с целью определения конструкции оптимальной по уровню возбуждаемого гидродинамического шума / Э. Г. Берестовицкий, А. Н. Крючков, П. И. Кизилов, Н. В. Пялов // Системы управления и обработки информации: научн.-техн. сб., ОАО «Концерн «НПО «Аврора». СПб, 2015. - Вып. 30. - С. 76-81.

[10] Рыбинская Л. А. Эффективность методов снижения шума турбулентных струй / Л. А. Рыбинская, Р. В. Бульбович, В. И. Кычкин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2017. - № 48. - С. 104 – 119.

[11] Бесшумная работа. Решения Fisher для устранения шумов [Электронный ресурс], - <http://www.fishvalve.nt-rt.ru> - статья в интернете. (Дата обращения: 15.03.2017 г.).

## MATHEMATICAL SIMULATION OF ELECTROHYDRAULIC CONTROL DEVICE FLOW CHARACTERISTICS ACCURACY DETERMINATION WITH PROCEEDING DATA VERIFICATION ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL STUDIES AT THE TEST BENCH

Erlen G. Berestovitskiy,  
Nikolay V. Pyalov,  
Michael V. Solovyev

Concern Aurora Scientific and  
Production Association JSC  
15, Karbysheva, S.-Petersburg, 196024,  
Russian Federation  
mail@avrorasystems.com,  
http://www.avrorasystems.com

*For the modern steam generator feed water flow control systems and new generation products requirements for vibrating characteristics and hydrodynamic noise are significantly increased. Currently, control devices meet the requirements of regulatory documents on vibration noise characteristics developed in 1980-ies.*

*To solve the problem of compliance with modern requirements previously flat (two dimensional – 2D) statement of problem was widely used. This approach does not give a complete and adequate picture of the physical fields of electro-hydraulic equipment. Therefore, it is necessary to gradually complicate the task and goes into a three-dimensional area.*

*We have done joint work with a number of computational companies that distribute or produce the various types of code for computational fluid dynamics (CFD) in order to determine ways of improving the acoustic quality of our products by the means of three-dimensional mathematical modeling with obtaining physical field parameters. On the basis of received information we made out the subsequent verification of experimental studies of the valve model, which had been previously analyzed in CFD, at the test bench.*

**Key words:** CFD; mathematical simulation; vibration; valves; hydrodynamic noise; feed water regulators; throttle; steam generator; low-noise equipment

## References

- [1] Shlikhting, G. (1974), *Teoriya pogrannichnogo sloya* [The theory of boundary layer], Nauka, Moscow, Russia, 536 p.
- [2] Munin, A.G. and Naumenko, Z.N. (1970), “Zvukovaya moshhnost', sozdavaemaya uchastkami dozvukovoj strui” [Sound power, created by subsonic jet areas], *Uchenye zapiski TsAGI [TsAGI Science Journal]*, no. 5, vol. 1, pp. 29 - 38.
- [3] Lighthill, M.J. (1952), “On sound generated aerodynamically: I. General theory”, *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 211, issue 1107, pp. 564-587.
- [4] Birkhof, G. and Sarantonello, E. (1964), *Strui, sledy i kaverny* [Jets, wakes and cavities], Mir, Moscow, 467 p.
- [5] Gurevich, M.I. (1979), *Teoriya struj ideal'noj zhidkosti* [The theory of jets of ideal fluid], Nauka, Moscow, Russia, 713 p.
- [6] Glikman, B.F. (1986), *Matematicheski modeli pnevmogidravlicheskih system* [Mathematical models of pneumatic and hydraulic systems], Nauka, Moscow, Russia, 368 p.
- [7] Sarafanov, I.A. (2016), *Ehksperimental'nye issledovaniya i razrabotka metodov rascheta konstruktivnykh parametrov reguliruyushhikh organov korabel'nykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya yadernykh paroehnergeticheskikh ustanovok* [Experimental research and development of methods for calculating the design parameters of the regulatory bodies of ship systems of automatic control of nuclear steam power plants], AO “Kontsern “NPO “Avrora”, St. Petersburg, Russia, 404 p.
- [8] Berestovitskij, E.G., Gladilin, Y.A., Golovanov, V.I. and Sarafanov, I.A. (2008), Snizhenie vibratsii i shuma gidrav-licheskih priborov sistem upravleniya tekhnicheskimi sredstvami [Reduction of noise and vibration of hydraulic systems devices control equipment], *Asterion*, St. Petersburg, Russia, 316 p.
- [9] Berestovitskij, E.G., Kryuchkov, A.N., Kizilov, P.I. and Pyalov, N.V. (2015), Matematicheskoe modelirovanie protochnykh chastej organov regulirovaniya SAU TS s tsel'yu opredeleniya konstruktssii optimal'noj po urovnyu vzbuzhdaemogo gidrodinamicheskogo shuma [Mathematical modeling of Pro-precise parts of the control system of the vehicle with the purpose of determining the design of the optimal level of excited hydrodynamic noise], *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii: nauchn.-tekhn. sb.*, AO “Kontsern “NPO “Avrora”. SPb. [Control and information processing systems], no. 30, pp. 76-81.

[10] Rybinskaya, L.A., Bul'bovich, R.V. and Kychkin, V.I. (2017), "Ehffektivnost' metodov snizheniya shuma turbulentnykh struj" [The Effectiveness of turbulent jets noise reducing methods], *Vestnik PNIPU. Aehrokosmicheskaya tekhnika*, no. 48, pp. 104 – 119.

[11] Besshumnaya rabota. Resheniya Fisher dlya ustraneniya шумов [Silent operation. The Fisher company solution for removing noise], available at: [www.fishvalve.nt-rt.ru](http://www.fishvalve.nt-rt.ru) (Accessed: 15.03.2017).