

УДК 62-137

**Экспериментальная верификация данных численного эксперимента на основе
дифференциального метода применительно к центробежному насосу двухстороннего
входа**

Ломакин В. О.¹, Петров А. И.², Горбенко П. Е.³

¹ *к.т.н., кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»*

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

² *Доцент, кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»*

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

³ *Студент, кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»*

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

МГТУ им. Н. Э. Баумана

МГТУ им. Н.Э. Баумана

alex_i_petrov@mail.ru

Введение.

В настоящее время при создании новых насосов и гидротурбин широко используются современные методы вычислительной гидродинамики, позволяющие качественно улучшить энергоэффективность гидромашин, свести к минимуму экспериментальную отработку проточных частей. Однако ключевой проблемой является верификация данных, полученных путем численных расчетов. Наиболее широко распространена верификация на основе интегральных характеристик гидромашин и их макетов, но с научной точки зрения важнее (для понимания процессов, происходящих в гидромашине) использовать дифференциальные методы верификации, основанные на непосредственном замере давлений и скоростей в большом количестве точек проточной части насоса или турбины.

В процессе совместной работы кафедры Э10 “Гидромеханика, гидромашины и гидро- пневмоавтоматика” МГТУ им. Н.Э. Баумана и “Нефтекамского машиностроительного завода” по созданию модельного ряда нефтяных магистральных насосов типа НМ был создан стенд для испытаний уменьшенных моделей исследуемых насосов (Рис. 1). Стенд используется не только для получения характеристик проточных частей моделей насосов, но и для верификации данных, полученных в результате численного эксперимента.

Результаты сравнения интегральных характеристик моделей, полученных в результате численного гидродинамического моделирования и экспериментально опубликованы в работе [1].

1 Описание установки

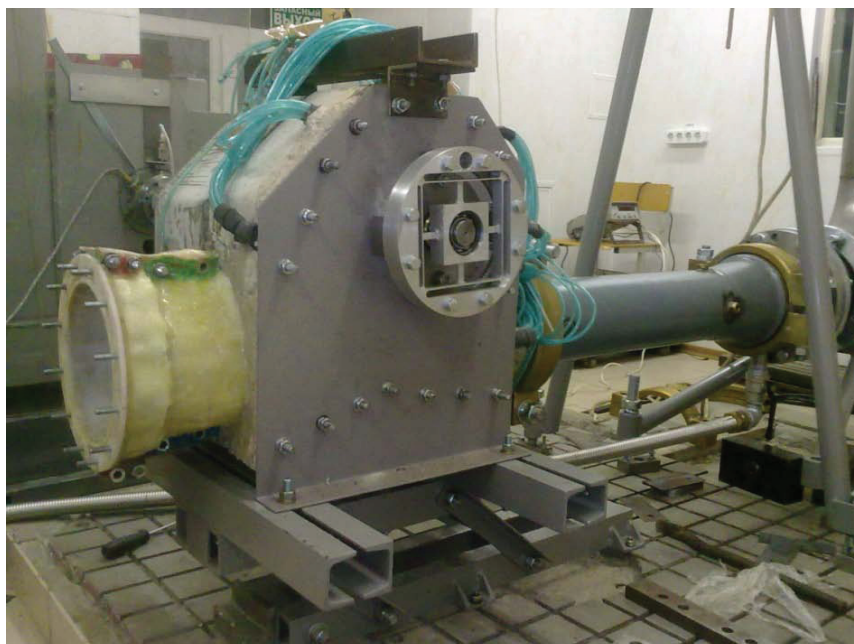


Рис. 1. Стенд для испытаний насосных агрегатов

Для верификации результатов численного расчета не только по интегральным характеристикам (напор, момент на валу и пр.), но и по локальным характеристикам (замеры давления в различных точках проточной части насоса) стенд был оборудован системой замера давлений.

Давления измеряется в разных точках проточной части насоса посредством пластиковых трубок (Рис. 2), одни концы которых помещены в полость проточной части, другие подсоединены к блоку датчиков (Рис. 3). От блока датчиков по экранированным электрическим кабелям сигналы поступают в коммутационный блок, который придает

сигналам требуемые электрические качества. От преобразователя сигналы идут на платы АЦП, посредством плат данные заносятся в память персонального компьютера.

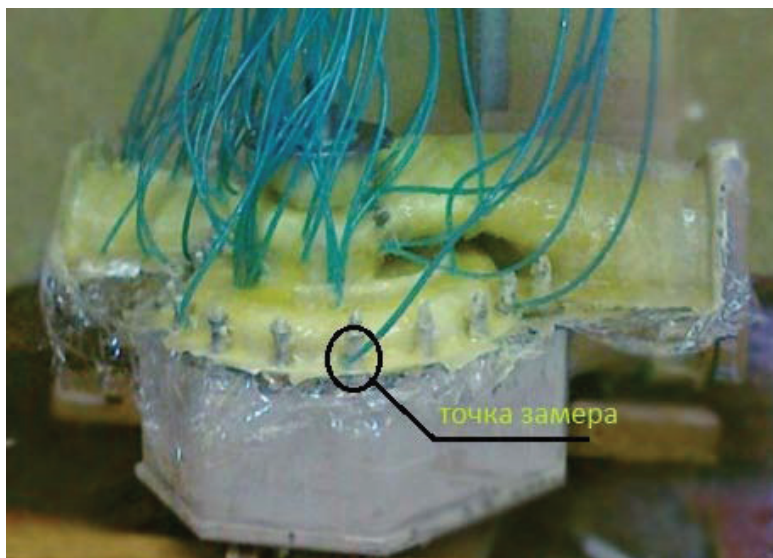


Рис. 2. Трубки для замера давления в насосе

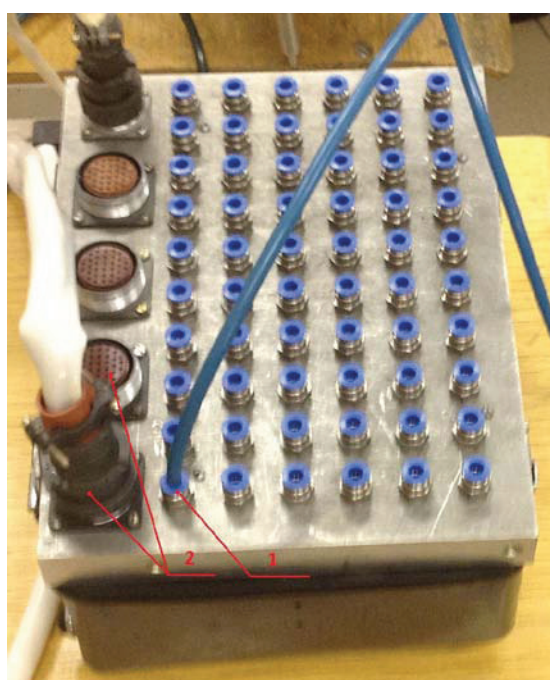


Рис. 3. Блок датчиков

(1 – присоединение трубки к датчику, 2 - электрические разъёмы)

Для возможности выполнения многих задач, таких как снятие данных, их упорядочение, запись в память компьютера в виде удобном для дальнейшей обработки, мониторинга текущего состояния насоса на разных частотах опроса датчиков, снятия

данных со всех датчиков одновременно в разных режимах работы платы, быстрая тарировка системы, был разработан соответствующий алгоритм и написан код программы для записи данных, а также разработан интерфейс такой программы (Рис.4).

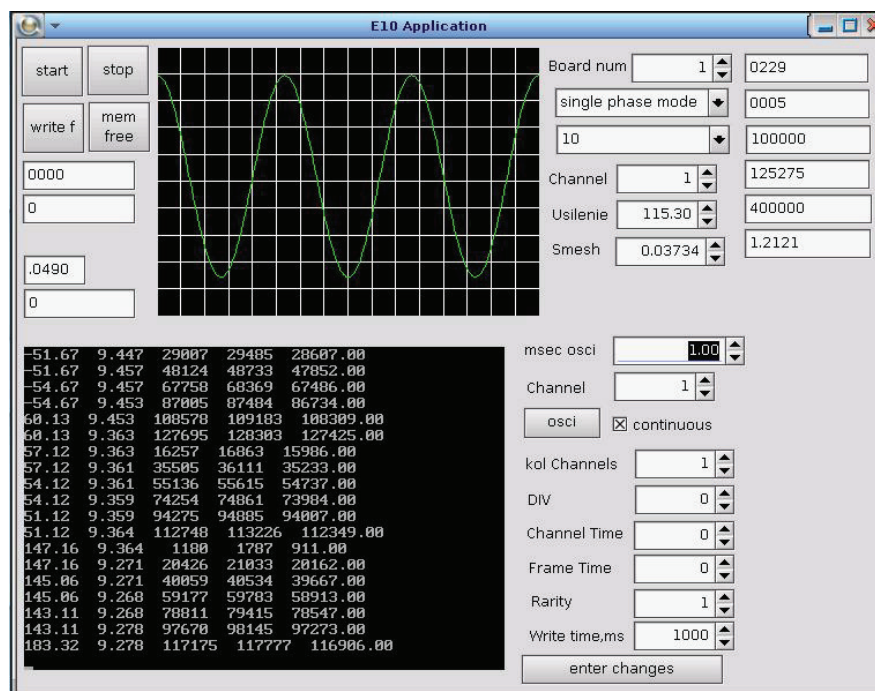


Рис. 4. Интерфейс программы для записи данных по замеру давления в проточной части насоса

Созданная система сбора информации позволяет проводить замеры давления в 60 точках одновременно (интервал между замерами 2,5 мкс) и с высокой частотой (до 20-100 кГц), что позволяет регистрировать как статические, так и пульсационные составляющие давления в различных точках.

На рис. 5 приведена рабочая карта расположения датчиков в проточной части насоса по номерам.

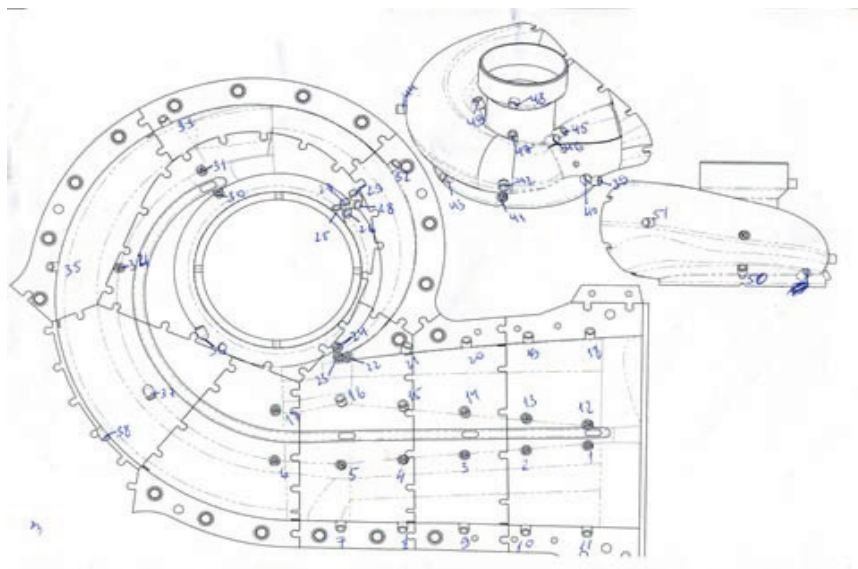


Рис. 5. Карта расположение датчиков

2 Полученные результаты.

В качестве примера можно рассмотреть результаты испытаний макета насоса МНМ7000-210. Результаты измерения датчиков при частоте вращения 1500 об/мин и подаче 148,2 м³/ч, усредненные по времени, приведены в таблице (Таблица 1).

Таблица 1

Показания датчиков давления при эксперименте

№ датчика	Статический напор, м	№ датчика	Статический напор, м	№ датчика	Статический напор, м
1	14,15	19	13,85	37	13,54
2	13,99	20	13,90	38	13,78
3	14,10	22	13,71	39	7,01
4	14,07	23	12,49	40	6,89
5	14,00	24	12,36	41	6,79
6	13,94	25	11,78	42	7,00
7	13,93	26	12,33	43	6,78
8	14,00	27	12,65	44	6,88
9	13,97	28	12,92	45	6,95
10	13,95	29	13,01	46	6,97
11	14,02	30	12,03	47	6,75
12	14,03	31	13,26		
13	14,08	32	13,57		
14	13,86	33	13,76		
16	13,75	34	13,55		
17	13,48	35	13,83		
18	14,10	36	12,77		

В результате численного гидродинамического моделирования были получены поля распределения давления в различных элементах проточной части насоса.

Некоторые результаты моделирования ниже (Рисунок 6, Рисунок 7, Рисунок 8):

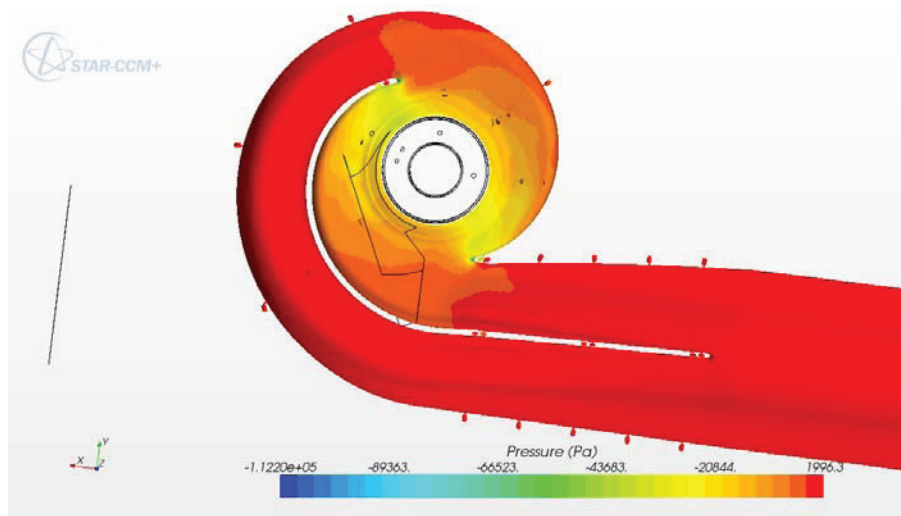


Рис. 6. Распределение давления по внутренней стенке корпуса отводящего устройства МНМ7000-210

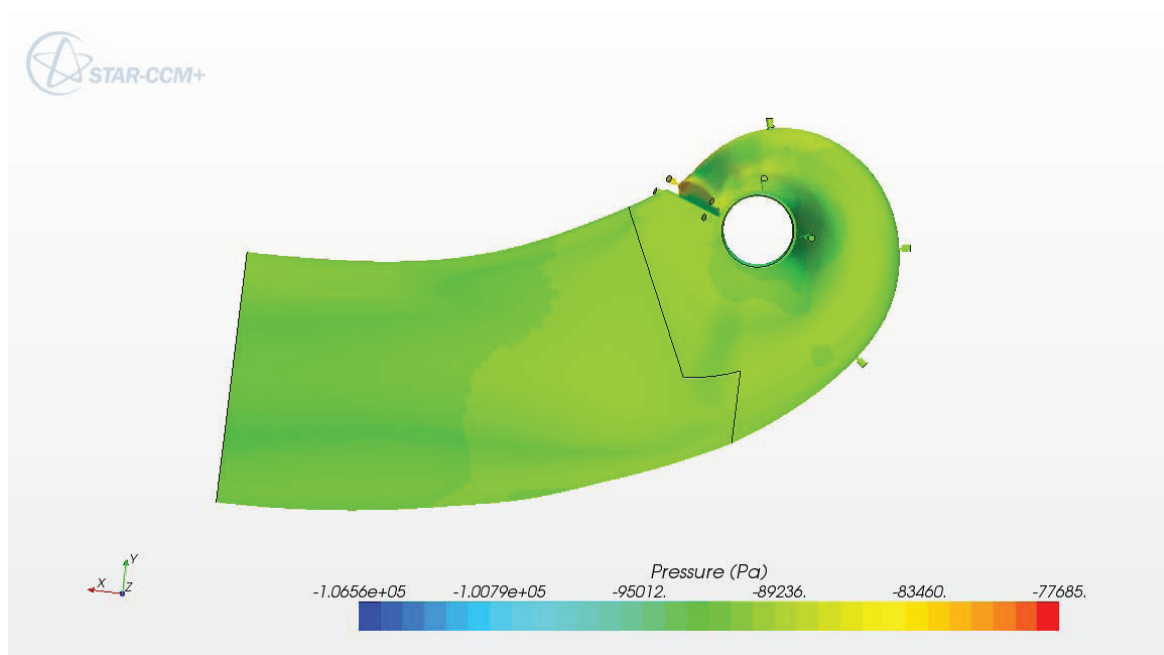


Рис. 7. Распределение давления по внутренней стенке корпуса подводящего устройства МНМ7000-210

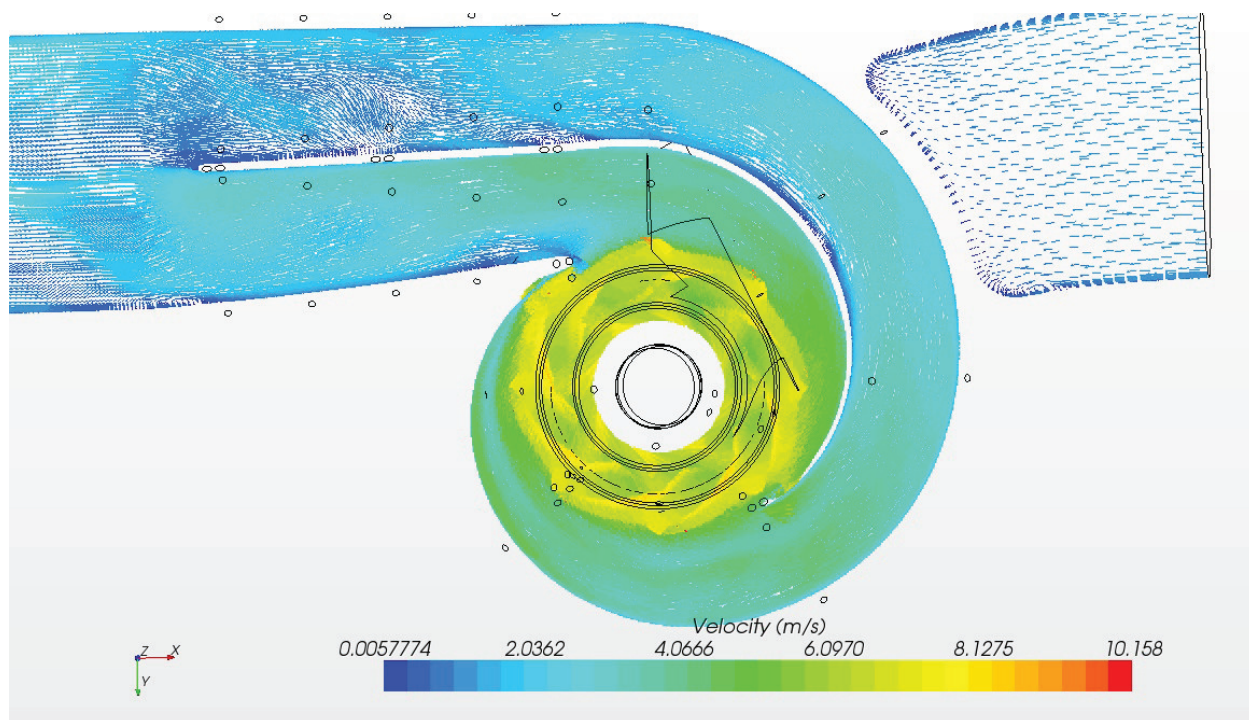


Рис. 8. Векторное поле скоростей в сечении насоса МНМ7000-210

Расчет интегральных характеристик при подаче $148,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ (оптимальная точка по результатам испытаний) показало хорошее совпадение с данными моделирования (Таблица 2).

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных характеристик насоса МНМ7000-210

Расчетный скорректированный напор Н, м	Экспериментально определенный напор Н, м	Погрешность, %
6,94	7	0,9
Расчетный скорректированный момент М, Нм	Экспериментально определенный момент Нм, м	Погрешность, %
21,9	22,1	0,9

Было проведено сравнение локальных значений давления, полученных расчетным и экспериментальным путем.

Результаты приведены в табличном виде (Таблица 3).

Таблица 3

Сравнение локальных значений статического напора, полученных экспериментальным и расчетным путем

№ датчика	Стат. напор эксп., м	Стат. напор расч., м	Погр.,%	№ датчика	Стат. напор эксп., м	Стат. напор расч., м	Погр.,%
1	14,15	14,15	0	19	13,85	14,12	1,96
2	13,99	14,14	1,10	20	13,90	14,07	1,24
3	14,10	14,10	0,00	22	13,71	13,91	1,46
4	14,07	14,08	0,04	23	12,49	12,44	0,34
5	14,00	14,07	0,50	24	12,36	12,56	1,69
6	13,94	14,04	0,71	25	11,78	12,25	3,98
7	13,93	14,08	1,04	26	12,33	12,56	1,91
8	14,00	14,11	0,78	27	12,65	12,87	1,78
9	13,97	14,12	1,04	28	12,92	13,10	1,42
10	13,95	14,12	1,22	29	13,01	13,24	1,76
11	14,02	14,16	0,97	30	12,03	12,66	5,20
12	14,03	14,13	0,75	31	13,26	13,47	1,56
13	14,08	14,10	0,16	32	13,57	13,79	1,67
14	13,86	14,06	1,44	33	13,76	13,91	1,14
16	13,75	13,91	1,16	34	13,55	13,80	1,82
17	13,48	13,74	1,90	35	13,83	14,07	1,75
18	14,10	14,15	0,36	36	12,77	13,09	2,46
№ датчика	Стат. напор эксп., м	Стат. напор расч., м	Погр.,%				
37	13,54	13,92	2,82				
38	13,78	14,10	2,37				
39	7,01	7,21	4,63				
40	6,89	7,12	4,88				
41	6,79	7,20	2,85				
42	7,00	7,09	4,56				
43	6,78	7,23	5,10				
44	6,88	7,21	3,75				
45	6,95	7,16	2,69				
46	6,97	7,03	4,10				
47	6,75	7,21	4,63				

Для приближенного расчета радиальной нагрузки на ротор были использованы средние значения за 1 с показаний с датчиков давления номер 24, 28, 30, 36 расположенных по периферии рабочего колеса (Таблица 4).

Таблица 4

Показания датчиков давления, расположенных по периферии рабочего колеса

№ датчика	Среднее значение статического напора, м
24	12,9
28	14,7
30	12,9
36	15

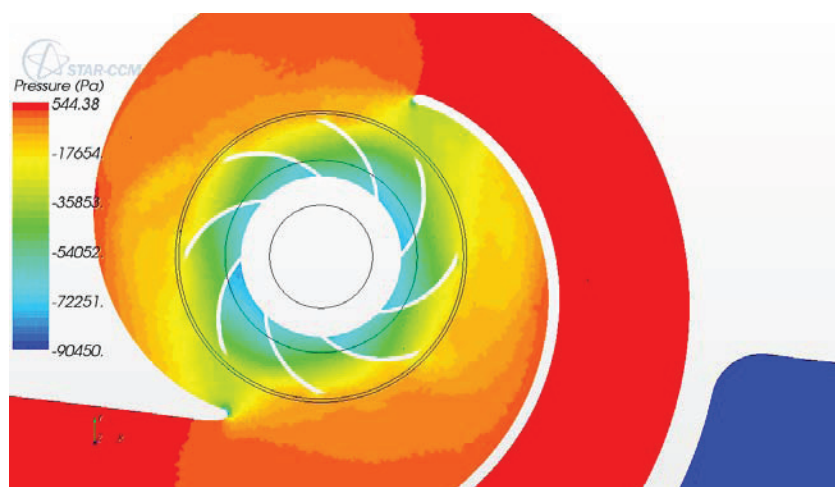


Рис. 9. Поле распределения давления вблизи рабочего колеса

Расчетное значение радиальной нагрузки на ротор насоса в данном режиме составляет 25 Н.

Среднее значение нагрузки, вычисленной по экспериментальному перепаду давления в оппозитных точках составляет около 20 Н, таким образом, даже расчет радиальной силы по такой упрощенной методике на основе дифференциального метода дает отклонение от теоретического не более чем на 20..25%. В дальнейшем планируется увеличить количество точек замера давления и повысить точность определения сил на роторе насоса.

Заключение

Верификация, проведенная на основе дифференциального метода, показала, что локальные значения давления, полученные экспериментально и численным методом совпадают в среднем с точностью 1-3%, что позволяет исследовать гидродинамические процессы в проточной части насоса на основе математической модели. В перспективе

планируется также осуществлять замеры скоростей потока в пристенных слоях, что позволит еще точнее сопоставить данные численного и физического экспериментов.

Список литературы

1. Ломакин В. О., Петров А. И. Численное моделирование проточных частей макетов насосов и верификация результатов моделирования путем сравнения экспериментально полученных величин с расчетными [Электронный ресурс]. Научн. техн. журн. Наука и Образование. / МГТУ им. Н.Э.Баумана – Электр. журнал. Май 2012. №5. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/index.html>. (24.09.2012)
2. CD-adapco STAR CCM UserGuide 6.02. США 2011. URL: http://158.110.32.35/download/SCD/star_uguide.pdf . (Дата обращения 19.03.2012)
3. ГОСТ 6134-2007 Насосы динамические. Методы испытаний. М: 2007. 91 с.