

Определение начала кавитации рабочего колеса водомета с использованием современных численных методов

М.П. Лобачев, А.А. Рудниченко

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

В работе рассмотрен метод определения начала кавитации в модельных условиях на рабочих колесах водометов применительно к водометам насосного типа. Метод основан на проведении численного моделирования обтекания водометов на основе решения уравнений Рейнольдса. Предложены два варианта метода: на основе анализа областей с давлением ниже давления насыщенного пара (без расчета собственно кавитации) и на основе расчета кавитации с привлечением модели Шнеппера и Сауэра (Schnerr and Sauer). Проведено сопоставление с результатами физического эксперимента, в котором начало кавитации определяется по визуальным наблюдениям. Для расчетного метода предложен критерий определения начала кавитации по объемам областей с пониженным давлением (расчет без кавитации) или объемам каверн (расчет с кавитацией), определяемым по концентрации паровой фазы – 5%. Для стандартных условий модельного эксперимента (диаметр рабочих колес – 200-250 мм) этот объем составляет 1 мм³. Показано, что оба метода дают результат с точностью, достаточной для практического использования. Причем возможен прогноз без использования модели кавитации. Однако даже в этом случае при использовании 20 процессоров Intel Xeon E5-2697 v2 время, требуемое, для прогноза кавитации на минимально необходимом числе режимов составляет порядка 12-ти суток. Указано только время выполнения собственно расчетов. При использовании второго метода, что желательнее при геометрии рабочих колес, значительно отличающихся от рассмотренной, суммарное время расчетов на тех же ресурсах может составить порядка 48 суток. Т.е. использование высокопроизводительных вычислительных систем при решении таких задач является обязательным.

Ключевые слова: корабельная гидродинамика, гребной винт, рабочее колесо, водомет, движитель, кавитация, уравнения Рейнольдса.

1. Введение

В последнее время все более ужесточающиеся требования по снижению шумности и виброактивности предъявляются не только к движителям подводных лодок и надводных кораблей, но и к движителям гражданских судов. Для некоторых из них требования даже более жесткие, чем для боевых кораблей. Под движителями здесь понимаются гребные винты и водометы различных типов. В этой связи разработка новых подходов к проектированию малошумных движителей судов является весьма актуальной. Одним из мероприятий, могущих повысить качество проектирования, является внедрение в процесс проектирования движителей современных численных методов моделирования физических процессов, протекающих при работе движителей. Однако внедрению таких методов препятствует отсутствие достаточно хорошо проработанных методик выполнения расчетов применительно к конкретным объектам морской техники.

При разработке малошумных движителей судостроители в первую очередь столкнулись с шумами кавитационной природы [1]. Особенностью кавитационного шума является его критический характер по скорости хода: до возникновения кавитации движителя он полностью отсутствует, после возникновения кавитации интенсивность шума стремительно растет с увеличением скорости. Поэтому при проектировании малошумных движителей ставится задача отдаления начала кавитации в область больших скоростей хода. Отсюда и задача для численного моделирования малошумных движителей: требуется правильно предсказать именно начало кавитации. При наличии такого расчетного метода становится возможным отработка методами численного моделирования мероприятий по отдалению начала кавитации.

Кавитация – (от латинского *cavitas* — пустота) — образование в жидкости полостей (кавитационных пузырьков, или каверн), заполненных газом, паром или их смесью. Гидродинамическая кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости, которое может происходить при увеличении её скорости [2,3]. Т.е. при наличии кавитации приходится иметь дело с течением многофазных сред. Основными подходами к моделированию течений многофазных сред являются эйлеровско-эйлеровское и лагранжево-эйлеровское описания [4].

В первом случае традиционным в технических приложениях является подход, в котором течение остается многофазным, однако исследуемая среда заменяется смесью, имеющей непрерывные (континуальные) распределения плотностей, скоростей, давлений и других параметров каждой из фаз. Моделирование двухфазного течения водяной пар/вода в большинстве случаев осуществляется с использованием метода Volume of Fluid (VOF) [5]. Однако для подобных моделей не характерен учет физики процессов эволюции пузырей, образующихся при кавитации, а это в случае моделирования начала кавитации или определения уровней кавитационного шума является определяющим фактором.

В рамках второго подхода движение несущей фазы определяется уравнениями динамики сплошной среды, а для описания движения дисперсной фазы (в частности, пузырьков) используется подход Лагранжа, основанный на введении набора пробных частиц. Этот подход требует значительных вычислительных затрат, однако позволяет проводить расчет динамики каждой пробной частицы (пузыря) индивидуально [6]. Благодаря этому преимуществу использование методов лагранжево-эйлеровского описания в ряде случаев представляется предпочтительным (возникновение кавитации или разрушение кавитационных каверн со схлопыванием их «обломков»). Однако внедрение таких методов в практику проектирования движителей представляется в настоящее время нереальным по трем причинам. Во-первых, это отсутствие этих методов в составе коммерческого программного обеспечения (как зарубежного, так и отечественного), в основном используемого в процессе проектирования. Во-вторых, отсутствие финансирования и кадров, способных внедрить эти методы в специализированные программные коды, используемые при решении ряда задач корабельной гидродинамики. В-третьих, уже указанная выше потребность в использовании значительных вычислительных ресурсов, привлечение которых при проведении проектных работ в большинстве случаев невозможно по причине финансовых и временных ограничений. Для практического использования в процессе проектирования движителей судов требуется разработка как можно менее ресурсоемких методов численного определения начала кавитации, пусть даже имеющих ограничения по типам движителей.

В статье [7], обобщающей опыт работ, выполнявшихся в течении пяти лет в суперкомпьютерном центре ФГУП «Крыловский государственный научный центр», наглядно показано, что современное состояние численных методов и суперкомпьютерной техники позволяет с достаточной для инженерных задач точностью прогнозировать кавитационные характеристики объектов морской техники и в первую очередь гидродинамические характеристики судовых движителей, работающих в условиях наличия кавитации. При этом использовался именно эйлеровско-эйлеровский подход в сочетании с методом VOF для моделирования раздела фаз. Представляется целесообразным разработка метода определения начала кавитации на основе использовавшихся при выполнении работ [7] методов расчета кавитации. При этом достижение точности, требуемой для выполнения проектных работ, возможно за счет привлечения информации из физического эксперимента для конкретных типов движителей.

В данной работе представляются результаты, полученные при разработке такого метода применительно к рабочим колесам водометов насосного типа с коротким водоводом [8]. С целью сокращения ресурсоемкости численного метода, используемого для прогнозирования начала кавитации, выполнены проработки, позволяющие для данного типа движителей осуществлять прогноз начала кавитации на основе расчетов обтекания водомета без собственно моделирования кавитации.

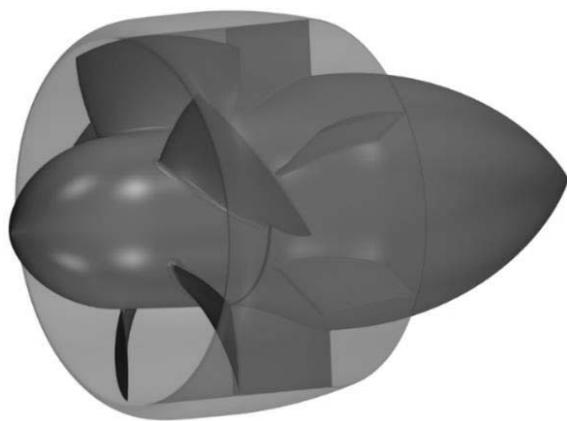
2. Используемые численные методы и объект исследования

Для прогнозирования характеристик моделей движителей методами вычислительной гидродинамики в работе применяется коммерческий пакет Star-CCM+, разрабатываемый фирмой CD-Adapco (в настоящее время принадлежит концерну Siemens). Характеристики течения вязкой

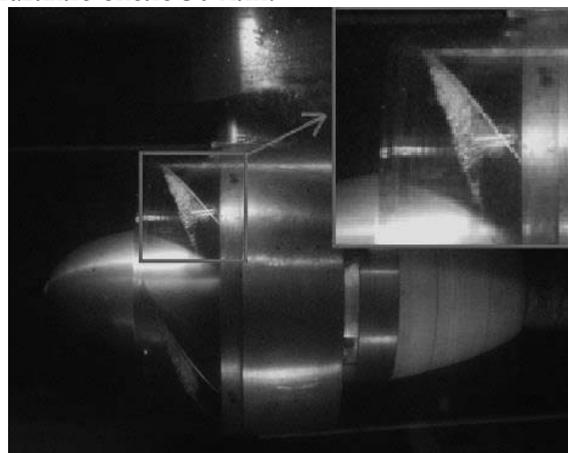
жидкости вокруг моделей движителей находятся из решения уравнений Рейнольдса для несжимаемой жидкости, замкнутых $k-\omega$ SST моделью турбулентности Ментера [9,10]. Пакет располагает собственным сеточным генератором, позволяющим строить полиэдральные или гексаэдральные сетки с призматическими слоями вблизи границ. Последнее весьма важно при моделировании поверхностной кавитации. При этом необходимо использование низкорейнольдсовых версий модели турбулентности и построение соответствующих расчетных сеток [11].

Моделирование двухфазного течения водяной пар/вода осуществляется с использованием метода Volume of Fluid (VOF) [5], а для учета эффектов конденсации и парообразования в уравнение для концентрации пара добавляется источник член согласно модели Рэлея-Плессета в варианте, предложенном Schnegg and Sauer [12]. Учитываются силы поверхностного натяжения. Задачи решаются в нестационарной постановке со схемами второго порядка для дискретизации по пространству и времени.

Все расчеты выполнялись применительно к модельным размерам движителей. Типичным является диаметр рабочих колес – 200-250 мм. Параметры сред в расчетах принимались соответствующие условиям физического эксперимента. В [7] на примере решения практических задач было показано, что описанного выше подхода к численному моделированию достаточно для режимов без кавитации либо для слабо выраженного кавитационного обтекания. В качестве объекта для демонстрации выбран водометный движитель насосного типа (ВДНТ) с коротким водоводом [7,8]. Внешний вид водомета представлен на Рис.1а. Водометный движитель состоит из центрального тела, рабочего колеса, спрямляющего аппарата и насадки. На Рис.1а рабочее колесо, на котором собственно и развивается кавитация, выделено цветом. Насадка показана полупрозрачной. В работе [7] для данного объекта было показано, что для случая уже хорошо различимой каверны, погрешность расчета гидродинамических характеристик по отношению к экспериментальным данным составляет 2–6 %. Причем меньшие погрешности соответствуют рабочим режимам. Зоны кавитации, возникающие в районе концевых сечений лопаток рабочего колеса, в расчете соответствуют экспериментальным. При выполнении расчетов, представленных в [7], общее количество ячеек в расчетной области составляло около 30 млн.



а



б

Рис.1. а) Общий вид водометного движителя насосного типа с коротким водоводом.
б) Зона кавитации в районе концевых сечений лопастей. $J=1.5$, $\sqrt{\sigma_n}=0.427$.

На Рис.1б представлена фотография, сделанная во время эксперимента в средней кавитационной трубе ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Передняя часть насадки в районе рабочего колеса сделана прозрачной для наблюдения за кавитационной каверной. Видно, что даже при достаточно развитой каверне она имеет дискретный характер, т.е. наблюдается наличие смеси воды и пузырьков пара. Тем не менее результаты по прогнозированию границ каверны при использовании континуального подхода оказываются хорошими [7].

Здесь число кавитации по оборотам $\sigma_n = \frac{2 \cdot (P_{ref} - P_{vap})}{\rho \cdot (\pi n D)^2}$, где P_{ref} – уровень внешнего давления,

измеряемый в фиксированной точке кавитационной трубы при проведении эксперимента или задаваемый в той же точке при проведении расчетов; P_{vap} – давление насыщенных паров

воды; n – частота вращения гребного винта; D – диаметр рабочего колеса (гребного винта); ρ – плотность воды. Поступь рабочего колеса (гребного винта) $J = \frac{V}{nD}$, где V – скорость течения в трубе.

3. Определение начала кавитации

Экспериментально начало кавитации на моделях движителей определяют путем их испытаний в кавитационных трубах. Фотография установленного в кавитационной трубе ВДНТ приведена на Рис.16. Испытания обычно проводят при фиксированной частоте вращения рабочего колеса водомета или гребного винта. Скорость течения в кавитационной трубе задают для получения требуемого режима. Для каждого из заданных режимов понижают давление в трубе до появления кавитации. Затем медленно повышают давление, визуалью фиксируя момент исчезновения кавитации. Эксперимент проводится при стробоскопическом освещении. Результаты представляют в виде кавитационной диаграммы: зависимости корня квадратного числа кавитации $\sqrt{\sigma_n}$, при котором наблюдалось исчезновение кавитационной каверны, от поступи рабочего колеса J [13]. Кавитационная диаграмма для рабочего колеса водомета [8] показана на Рис.2. Представлены результаты двух экспериментов, проведенных с разрывом несколько лет.

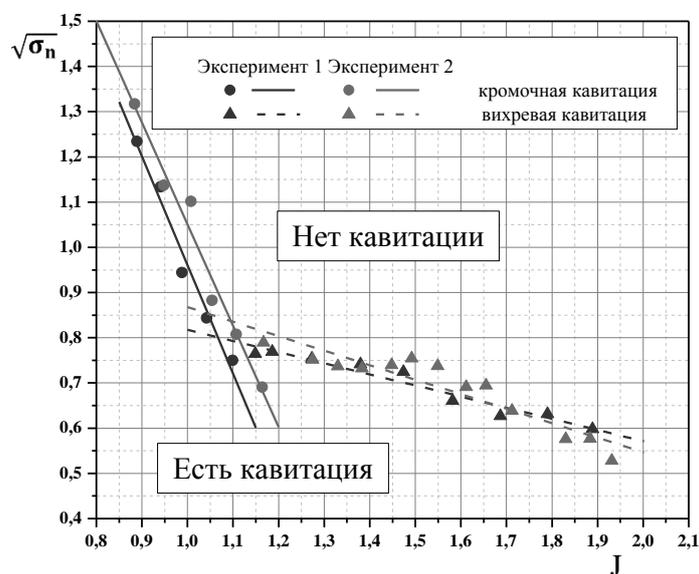


Рис.2. Кавитационная диаграмма для рабочего колеса водомета [8].

На кавитационных диаграммах разделяют различные виды кавитации (отмечены кружками и треугольниками). Линии соответствуют прямым, аппроксимирующим экспериментальные результаты (по методу наименьших квадратов). Ниже представленных прямых кавитация имеет место, выше – ее нет. Здесь кромочная кавитация (кружки) – кавитация на входящей кромке рабочего колеса водомета вблизи торца лопатки; вихревая кавитация (треугольники) – кавитация в ядре вихря, формирующегося в зазоре между торцом лопатки и внутренней поверхностью насадки за счет перетекания жидкости с нагнетающей стороны лопатки на засасывающую. Он фактически аналогичен концевому вихрю, формирующемуся на гребных винтах. Начинает этот вихрь формироваться в зазоре, но интенсивности, достаточной для достижения в ядре вихря разрежения, обеспечивающего возникновение кавитации, достигает уже в межлопастном пространстве. Кавитация в зазоре возникает на ребре, разделяющем торец лопатки и ее нагнетающую сторону, однако в данном случае она проявляется при существенно меньших числах кавитации (существенно меньших давлениях в кавитационной трубе).

Для иллюстрации на Рис.3 показаны полученные в расчете зоны с давлением ниже давления насыщенных паров. Вид с торца лопатки, насадка не изображена. Для большей наглядности приведены режимы, при которых величины областей возможной кавитации значительны. Поступь $J=1.2$; для кавитации в зазоре (синий цвет) и в концевом вихре (красный цвет) $\sqrt{\sigma_n}=0.7$; для кавитации у входящей кромке (зеленый цвет) $\sqrt{\sigma_n}=0.6$. Пришлось дать картину в реальности не

существующую, так как в противном случае не была бы видна либо область кавитации у передней кромки, либо не видна область кавитации в зазоре.

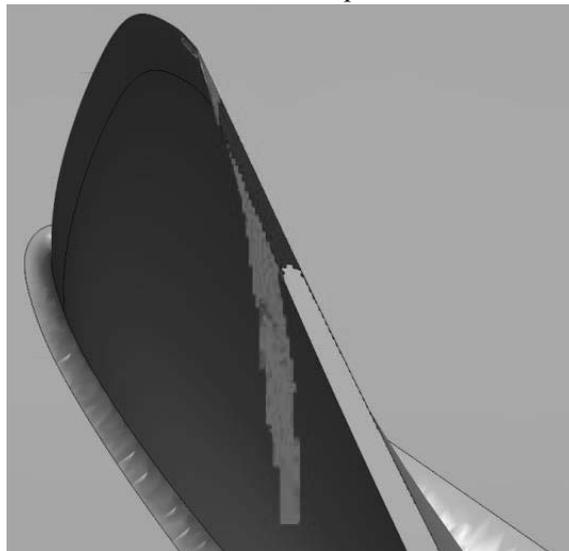


Рис.3. Области с давлением ниже давления насыщенных паров для рабочего колеса водомета [8]. Зеленый – входящая кромка, синий – зазор, красный – концевой вихрь. Вид с торца лопатки.

Визуальное фиксирование начала кавитации – не единственный возможный способ, хотя и наиболее распространенный ввиду его простоты. Возможно фиксирование начала кавитации и по измерениям пульсаций давления в потоке. Измерения выполняются специальными гидрофонами на определенном расстоянии от движителя. Условия измерений регламентированы соответствующими методиками. При возникновении кавитации появляются дополнительные пульсации по сравнению с фиксируемым шумом самой кавитационной трубы и с усилением кавитации они достаточно резко нарастают.

В обоих случаях при валидации расчетного метода определения начала кавитации возникает проблема выбора критерия начала кавитации в расчете. В случае сравнения с визуально определенным началом кавитации следует определиться, начиная с какого объема каверны в расчете считать, что она наблюдаемая. Более корректным является определение начала кавитации по площади каверны, наблюдаемой с того же ракурса, что и в эксперименте. Однако определение этой величины в расчете в автоматическом режиме затруднительно. Во втором случае регистрируемые в эксперименте при возникновении кавитации пульсации давления становятся различимыми только после превышения сигнала от них уровня сигнала от пульсаций давления, генерируемых самой кавитационной трубой (как потоком жидкости, так и механизмами). Хотя это и не так очевидно, но и здесь можно началу кавитации приписать определенный объем каверн. Собственно, это и будет той эмпирической информацией о которой говорилось во введении, и которая позволит обеспечить получение результатов расчетов пригодных для использования при проектировании. По уровню пульсаций давления, получаемых в расчете, о начале кавитации можно судить только в том случае, если разрешается как зарождение, так и схлопывание отдельных пузырьков. Т.е. только при использовании лагранжево-эйлеровского описания и достаточном количестве пробных частиц. Причем следует очень хорошо описывать процесс схлопывания, что в настоящее время практически нереально ввиду чрезвычайной ресурсоемкости такого подхода. В рамках эйлеровско-эйлеровского описания возможно только рассмотрение схлопывания отдельных пузырьков, когда реально построение адаптируемой в процессе решения расчетной сетки [14].

Безусловно, определение начала кавитации при использовании двух различных методов в физическом эксперименте дает различные результаты. При практическом использовании этих результатов далее при проектировании, используют соответствующие методики для пересчета этих результатов на натурные объекты морской техники, получая, в конечном итоге, одинаковые результаты. Некоторая информация приведена в [1]. Методики эти, обладая несомненным сходством, тем не менее, различны для каждого из гидродинамических судостроительных центров.

Соответственно критерии для расчетного определения начала кавитации должны позволять получать результат, соответствующий принятой в том или ином гидродинамическом центре методике/процедуре определения начала кавитации. В данной работе мы ориентировались на определение начала кавитации по данным визуальных наблюдений, что является стандартным для ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

4. Результаты расчетов

Ранее для определения интегральных характеристик, в том числе и при наличии развитой кавитации, использовались расчетные сетки размерностью порядка 30 млн. ячеек [7]. Как показано в [7], такой расчетной сетки достаточно для получения корректного результата. Для более качественного разрешения относительно малых объемов кавитации в данной работе расчетная сетка в области, соответствующей зоне их развития, была дополнительно сгущена. Размерность расчетной сетки при этом составила 47 млн. ячеек. Для расчетов обычно выделялось одно блейд-шасси, содержащее 10 двухпроцессорных узлов на процессорах AMD Opteron 6174. Частота оперативной памяти 1067 МГц. В ряде случаев использовались блейд-шасси с 10-ю двухпроцессорными узлами на Intel Xeon E5-2697 v2. Частота оперативной памяти 1600 МГц. В обоих случаях объем оперативной памяти на узел составлял 64 Гб. Это соответственно узлы первой (2011 г.) и второй (2014 г.) очередей кластера «Крыловского государственного научного центра». Разница во времени проведения расчетов на этих процессорах для данного класса задач – 2.6 раза. Оба сегмента объединены высокоскоростной сетью с низкими задержками Mellanox QDR InfiniBand с топологией «толстое дерево».

Вопросам эффективности распараллеливания задач данного класса посвящена работа [15]. В 2014 году для рассмотренного в работе объекта требовалось только определение интегральных характеристик без кавитации, поэтому расчетная сетка составляла 8 млн. ячеек. Ускорение счета по сравнению с использованием одного ядра для использования 24 ядер (один узел) составляло 14.2 раза, для 240 ядер (10 узлов) – 126 раз. Для задачи с кавитацией, но для другого объекта и расчетной сеткой 38 млн. ячеек (близкой к данной работе) ускорение по сравнению с одним ядром составляло соответственно 16 раз (24 ядра – один узел) и 154 раза (240 ядер – 10 узлов). Данные приведены для сегмента кластера на Intel Xeon E5-2697 v2. Для организации параллельных вычислений пакет Star-CCM+, как и большинство коммерческих пакетов, использует mpi. Протестировав в 2014 году эффективность распараллеливания на типичных задачах корабельной гидродинамики к этому вопросу далее не обращались, а выбор количества используемых узлов определялся в основном срочностью и допустимым временем решения задач, количеством лицензий на различное ПО, задействованное в конкретный момент времени на кластере.

При постановке задачи «с начала», для получения вышедшего на режим течения без кавитации, требуется расчет около 20 оборотов рабочего колеса, что занимает примерно 9.2-10.8 тыс. ядро-часов (Intel Xeon E5-2697 v2). Расчеты ведутся с последовательно уменьшающимся шагом по времени. Последние 4-е оборота рассчитываются с постоянным шагом по времени. Затем для расчета кавитации выполняется расчет еще 4-х оборотов с подключением модели кавитации, что занимает 10-12 тыс. ядро-часов (Intel Xeon E5-2697 v2). Три оборота рассчитываются для выхода на режим, расчет еще одного оборота осуществляется для получения осредненных характеристик или для анализа нестационарности процесса. Расчеты выполняются с минимальным шагом по времени из первого расчета (без кавитации). Для определения объемов областей с пониженным давлением без расчета кавитации достаточно выполнения одного расчета при заданной поступи. При этом выводятся величины объемов областей, в которых давление ниже давления насыщенных паров, соответствующие различным числам кавитации. При расчете с кавитацией требуется выполнение расчетов для каждого числа кавитации отдельно. При этом выводятся объемы областей занятых паровой фазой с различной концентрацией. Обычно требуется от 3-х до 5-ти расчетов при различных числах кавитации.

При использовании 20 процессоров Intel Xeon E5-2697 v2 время, требуемое для прогноза начала кавитации без собственно расчета самой кавитации на минимально необходимом числе режимов, составляет порядка 12-ти суток (6 режимов по поступи). Указано только время выполнения собственно расчетов. При использовании в расчете модели кавитации, что желательно при

геометрии рабочих колес, значительно отличающихся от рассмотренной, суммарное время расчетов для определения начала кавитации на тех же ресурсах может составить порядка 48 суток (6 режимов по поступу).

При этом получаются выборки с объемом и дискретизацией, достаточными для анализа нестационарных характеристик (расчет пульсационной составляющей). Если требуется выполнение Фурье анализа, то выполняются более длительные расчеты. Требуемый объем выборки в этом случае определяется исходя из необходимого шага по времени и заданного интервала частот для анализа. Последовательность изменения временных шагов при выходе на режим и минимальный шаг по времени определяются типом движителя и условиями его работы, если величина шага по времени не определена условиями Фурье анализа. Для различных типов движителей разработаны соответствующие методики выполнения расчетов, обеспечивающие как получение решения независимого от дискретизации по пространству и по времени, так и минимально возможное, без потери точности, время выполнения расчетов.

Для разделения различных видов кавитации по их расположению, на основании предварительных расчетов (Рис.3) были построены соответствующие объемы для наблюдения (Рис.4), в которых и определялись далее в автоматическом режиме объемы кавитационных каверн или, для случая расчетов без кавитации, областей с давлением ниже давления насыщенного пара.

Объемы каверн и их соотношение между различными видами кавитации зависят как от поступи рабочего колеса, так и числа кавитации. Также от поступи зависит степень нестационарности каверн. На поступях от $J=1.2$ до $J=1.9$, включая рабочую поступь $J=1.5$, преобладающей, как видно из Рис.2, является вихревая кавитация. Результаты расчетов показывают тоже самое. При этом и степень нестационарности при больших поступях – наименьшая. При проведении физического эксперимента степень нестационарности практически невозможно оценить ввиду малости наблюдаемых размеров каверн, а также по причине использования при проведении эксперимента стробоскопического освещения. Поэтому все рассуждения о нестационарности в данной работе основываются на результатах расчетов.

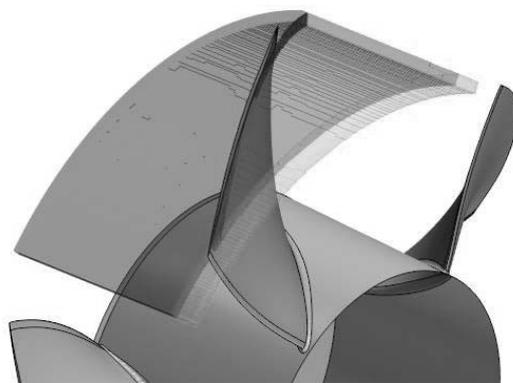


Рис.4. Разбивка пространства для определения объемов областей с давлением ниже давления насыщенных паров ($P < P_{\text{vap}}$). Зеленый – входящая кромка, синий – зазор, красный – концевой вихрь.

Начало концевой вихря находится близко от угла между входящей кромкой и торцом лопатки. Однако область наибольшего разрежения в вихре при уменьшении поступи смещается все ближе к входящей кромке лопатки, при этом усиливается нестационарность поведения вихря, даже для режима без кавитации. Так как при математическом моделировании используется эйлеровско-эйлеровское описание, то граница между фазами получается размытой. По этой причине при расчетах с привлечением модели кавитации определялись объемы областей, в которых содержание паровой фазы больше определенного (0.5%; 1%, 5%, 10%, 50%).

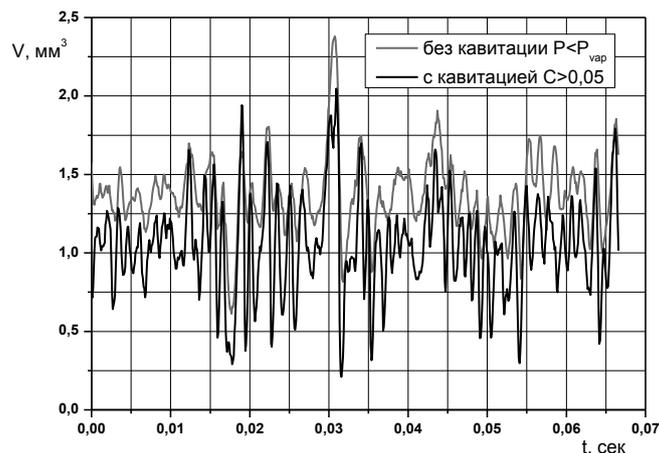


Рис.5. Изменение за оборот объемов области с $P < P_{\text{вар}}$ (расчет без кавитации) и области с объемной концентрацией пара $C > 0,05$ (расчет с кавитацией) в концевом вихре. $J=1,5$; $\sqrt{\sigma_n}=0,694$

На Рис.5 представлены результаты определения объемов области с $P < P_{\text{вар}}$ (расчет без кавитации) и области с объемной концентрацией пара $C > 0,05$ (расчет с кавитацией) в концевом вихре для рабочего режима, которому соответствует $J=1,5$. Временной период соответствует одному обороту рабочего колеса. Число кавитации примерно соответствует определенному по физическому эксперименту началу кавитации: $\sqrt{\sigma_n}=0,694$. В расчетах для рабочего режима, как и в физическом эксперименте, определяющим является кавитация в концевом вихре, поэтому соответствующие объемы для других видов кавитации и соответственно областей их проявления не показаны. Видно, что объемы с концентрацией пара 5 % примерно соответствуют объемам областей с $P < P_{\text{вар}}$, полученным для расчетов без кавитации. Принятое в расчетах число кавитации соответствует началу кавитации, зафиксированному в эксперименте №1, если его определять по линии, проведенной по методу наименьших квадратов (Рис.3).

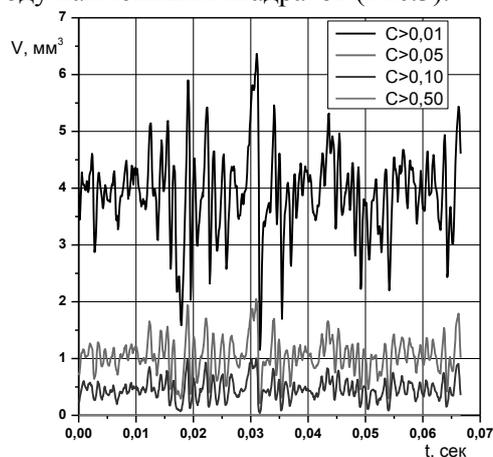


Рис.6. Изменение за оборот объемов пара в концевом вихре, определенных по различным уровням концентрации (расчет с кавитацией). $J=1,5$, $\sqrt{\sigma_n}=0,694$.

Объемы каверн, определяемые по концентрации пара больше определенной, весьма сильно различаются. На Рис.6 для того же режима, что на Рис.5, даны изменения объемов каверн за оборот, определенные по областям с различной концентрацией пара: 1%, 5%, 10%, 50% ($C=0,01, 0,05, 0,1, 0,5$). Следует отметить, что и в физическом эксперименте концентрация паровой фазы в каверне не 100%. Это определяется тем обстоятельством, что каверна не представляет собой единое целое, а состоит из совокупности дискретных пузырьков, что видно на Рис.1б. Принятие определенных правил определения, как объемов каверн, так и концентрации пара, по которой определяются эти объемы – это и есть та эмпирическая информация, которая может быть получена из сопоставления результатов расчетов и экспериментальных данных. Следует эти правила установить таким образом, чтобы для данного типа движителей расчеты позволяли прогнозировать начало кавитации соответствующее эксперименту. Собственно об этом говорилось как во

введении, так и в разделе 3. Тогда становится возможным использование результатов расчетов в сочетании с остальными методиками, принятыми при выполнении проектных работ.

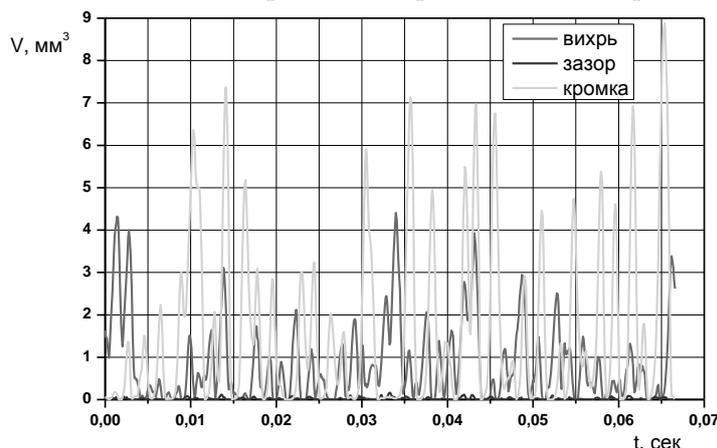


Рис.7 Изменение за оборот объемов области с $P < P_{\text{vap}}$ (расчет без кавитации) для режима $J=1.0$, $\sqrt{\sigma_n}=0.943$.

Выше говорилось, что соотношение объемов кавитационных каверн для различных видов кавитации зависит от режима работы рабочего колеса. Для режима $J=1.5$, представленного на Рис.5, объемы каверн в зазоре и у входящей кромки практически нулевые. Для режима $J=1.0$ начало кавитации определяет кавитация у входящей кромки, однако и объем каверны в конечном вихре также оказывается значительным. На Рис.7 представлены зависимости от времени объемов областей с $P < P_{\text{vap}}$ в различных регионах за один оборот рабочего колеса для $J=1.0$ при $\sqrt{\sigma_n}=0.943$. Расчеты выполнялись без включения модели кавитации. Величины объемов областей с $P < P_{\text{vap}}$ для режимов, представленных на Рис.5 и Рис.7, осредненные за оборот, даны в таблице 1. Кроме самих объемов V представлены и среднеквадратичные отклонения $СКО_V$. По этим результатам хорошо видно, что при уменьшении поступи нестационарность процессов усиливается, о чем выше уже говорилось. Анализ других режимов показывает точно такую же картину. Близкими по характеру оказываются и результаты для расчетов с учетом кавитации.

Таблица 1 Характеристика объемов областей с $P < P_{\text{vap}}$. Расчет без кавитации.

J	$\sqrt{\sigma_n}$		V, мм ³	СКО _V , мм ³	V/V _{sum} , %	СКО _V /V, %
1.5	0.694	Вихрь	1.372	0.241	99.95	17.21
		Зазор	$6.51 \cdot 10^{-4}$	$6.88 \cdot 10^{-5}$	0.05	0.01
		Кромка	$6.91 \cdot 10^{-5}$	0.002	0.01	0.13
		Суммарный объем V _{sum}	1.372	0.236	100.00	17.20
1.0	0.943	Вихрь	0.853	0.942	34.06	37.64
		Зазор	0.020	0.027	0.80	1.07
		Кромка	1.631	1.957	65.14	78.18
		Суммарный объем V _{sum}	2.504	2.152	100.00	85.98

На Рис.8 для конечного вихря представлены зависимости от времени объемов с $P < P_{\text{vap}}$, определенных как для расчетов с кавитацией, так и без кавитации, а также объемы области с концентрацией пара больше 5% (расчет с кавитацией). Там же приведены средние за оборот величины этих объемов. Учет кавитации приводит к некоторому уменьшению объемов области с $P < P_{\text{vap}}$, однако при этом объем паровой каверны несколько больше, чем области с давлением ниже насыщенных паров. Это связано как с уже упоминавшимся размыванием границы каверны при эйлеровско-эйлеровском подходе к моделированию двухфазной среды, так и с чисто физическим явлением: конечной скоростью конденсации пара. Каверна (или пузырьки ее составляющие) всегда схлопывается уже в области с давлением большим, чем давление насыщенных паров. Это явление учитывается в принятой модели конденсации, хотя учет выполнен несколько приближенно. Именно этот элемент математической модели, по нашему мнению, нуждается в корректировке.

Хотя это более существенно при расчете не начала кавитации, а для режимов с более развитой кавитацией.

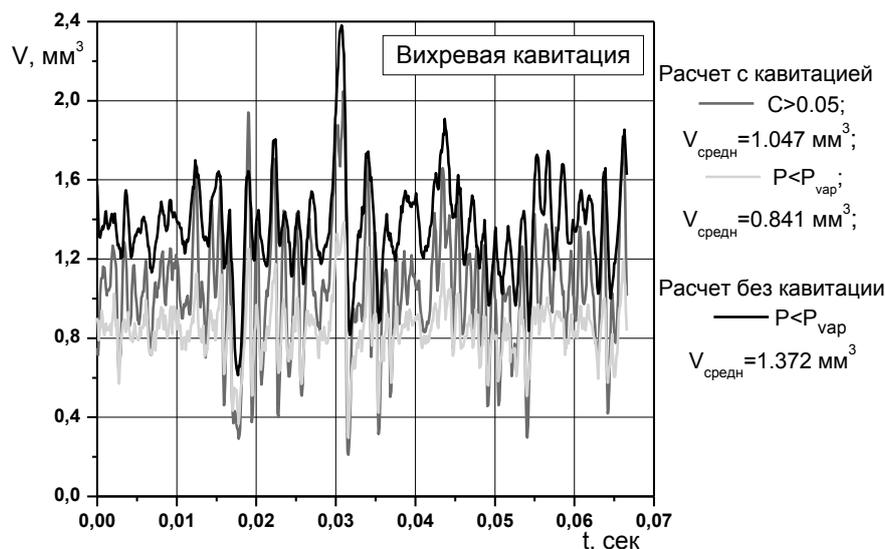


Рис.8. Изменение за оборот объемов области с $P < P_{\text{vap}}$ и области с объемной концентрацией пара $C > 0.05$ в концевом вихре. $J=1.5$, $\sqrt{\sigma_n}=0.694$.

5. Определение начала кавитации на основе результатов расчетов.

Как показывает анализ результатов расчетов, нарастание объемов каверн при уменьшении числа кавитации (снижении давления) происходит весьма быстро. Для иллюстрации на Рис.9 представлены зависимости объемов области в концевом вихре с $P < P_{\text{vap}}$ как в обычном (9а), так и в полулогарифмическом (9б) масштабе для рабочего режима $J=1.5$. В области начала кавитации изменение объемов идет весьма сильно. Далее при уменьшении числа кавитации (уменьшении задаваемого давления) относительный темп роста каверны замедляется (Рис.9б).

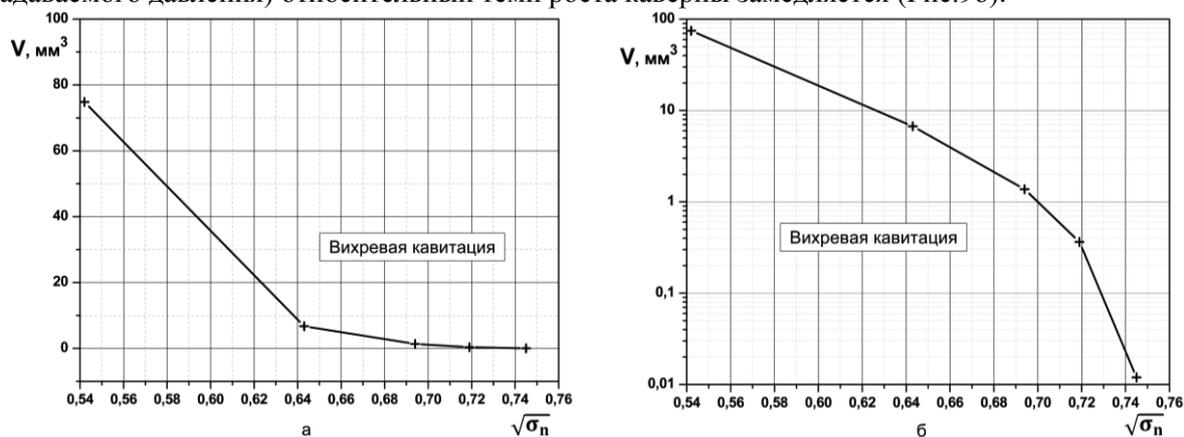


Рис.9. Зависимость объема области с $P < P_{\text{vap}}$ для рабочего режима $J=1.5$.

Основываясь на полученных расчетных результатах и их сопоставлении с результатами физического эксперимента можно предположить, что видимыми становятся каверны размером порядка 1 мм^3 . Причем при определении объема каверны концентрация паровой фазы на границе может быть принята 5%. В предыдущем разделе были приведены некоторые из полученных результатов при числах кавитации, близких к тем, что фиксировались как начало кавитации в физическом эксперименте. Для других поступей картины аналогичны.

Для сокращения объемов расчетов, тем более что изменение объемов от числа кавитации происходит весьма резко, целесообразно определение искомой величины кавитации на основе интерполяции полученных результатов. На Рис.10 представлены результаты определения объема области с $P < P_{\text{vap}}$ при различных числах кавитации. На этом же рисунке в виде вертикальных

линий обозначены числа кавитации, при которых в эксперименте фиксировалось начало кавитации. Даны числа кавитации, полученные с прямых линий, аппроксимирующих экспериментальные данные (Рис.3) – пунктирные линии (цвет линий соответствует Рис.3), а также среднее по двум экспериментам - сплошная сиреневая линия.

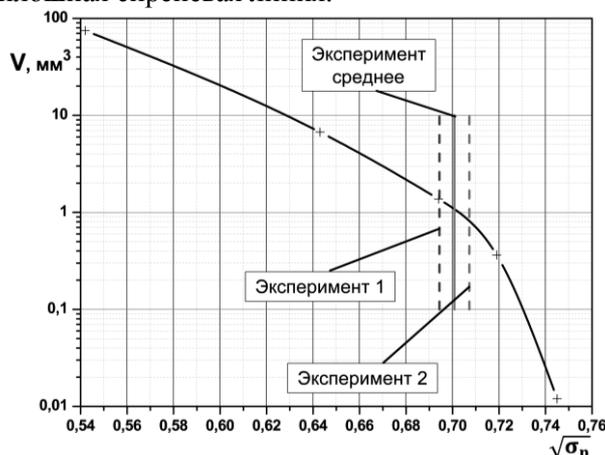


Рис.10. Сопоставление для рабочего режима $J=1.5$ зависимости объема области с $P < P_{\text{vap}}$ с результатами определения начала кавитации в физическом эксперименте.

Полученные на основе интерполяции расчетных результатов величины корня квадратного из числа кавитации $\sqrt{\sigma_n}$, соответствующие объему области с $P < P_{\text{vap}}$ равному 1 мм^3 , в зависимости от поступи рабочего колеса J представлены на Рис.11. Результаты расчетов с учетом кавитации на этом же рисунке представлены для четырех поступей: 0.9, 1.0, 1.5, 1.8. В случае расчетов с кавитацией объемы определялись для концентрации паровой фазы больше 1% и больше 5%. Разница между получаемыми величинами $\sqrt{\sigma_n}$ для граничной концентрации 1% и 5% незначительная, хотя сами объемы (Рис.4) могут отличаться значительно. Это следствие резкого изменения объема каверн при изменении чисел кавитации (снижении давления) в области начала кавитации. По отношению к изменению объемов каверн при изменении числа кавитации, изменения объемов областей с различной концентрацией пара (в диапазоне 1-5%) – незначительны.

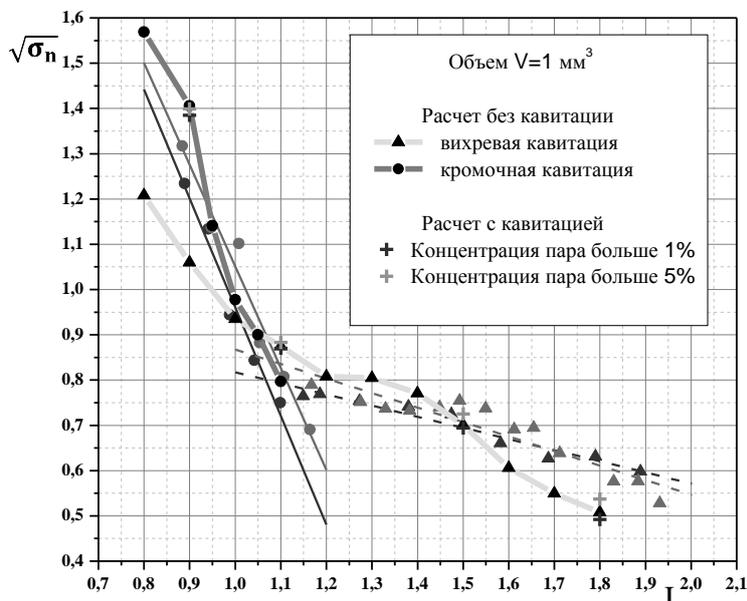


Рис.11 Зависимость числа кавитации σ_n начала кавитации от поступи рабочего колеса. Для эксперимента обозначения те же, что на Рис.2.

Хорошо видно, что расчеты с учетом кавитации дают примерно тот же результат, что и расчеты без кавитации. При этом потребные ресурсы без расчета кавитации существенно меньше

(см. начало раздела 4). Хотя при поступях $J > 1.5$ отклонение результатов расчетов от экспериментальных данных увеличивается, тем не менее, по оценке специалистов, данная точность прогнозирования достаточна для практического использования. Кроме того, следует отметить, что качественное поведение рассчитанной зависимости $\sqrt{\sigma_n(J)}$ при $J > 1.2$ оказывается ближе к результатам физического эксперимента №2, в котором также наблюдается изменение наклона кривой при $J = 1.5$. В настоящее время физические причины наличия такого изменения наклона еще не установлены. Но уже то, что он наблюдается как в расчете, так и хотя бы в одном эксперименте, заставляет предполагать достоверность его наличия. Хотя обычно принято аппроксимировать результаты эксперимента именно прямой линией.

4. Заключение

Применительно к условиям модельного эксперимента в работе предложен метод определения начала кавитации на рабочих колесах водометов насосного типа, основанный на проведении численного моделирования обтекания водометов с использованием решения уравнений Рейнольдса, замкнутых $k-\omega$ SST моделью турбулентности Ментера. Предложены два варианта метода: на основе анализа областей с давлением ниже давления насыщенного пара (без расчета собственно кавитации) и на основе расчета кавитации с привлечением модели Шнерра и Сауэра (Schneeg and Sauer).

Проведено сопоставление с результатами физического эксперимента, в котором начало кавитации определяется по визуальным наблюдениям. Для расчетного метода предложен критерий определения начала кавитации по объемам областей с давлением ниже давления насыщенного пара (расчет без кавитации) или объемам каверн (расчет с кавитацией), определяемым по концентрации паровой фазы – 5%. Для стандартных условий модельного эксперимента (диаметр рабочих колес – 200-250 мм) этот объем составляет 1 мм³. Показано, что оба метода дают результат с точностью, достаточной для практического использования. Однако желательно более точное установление этих параметров на основе дополнительных систематических расчетов.

Для рабочих колес с геометрией лопаток подобной рассмотренной, возможен прогноз начала кавитации без собственно расчета самой кавитации. Для геометрии лопаток значительно отличающейся от рассмотренной, представляется целесообразным проведение расчетов с моделированием кавитации, по крайней мере, для рабочего режима. В случае расхождения результатов прогноза для расчетов без кавитации и с кавитацией требуется проведение расчетов с кавитацией для всех режимов.

Время, необходимое для выполнения прогноза начала кавитации для минимально необходимого при проектировании числа режимов при использовании 20 процессоров Intel Xeon E5-2697 v2 составляет порядка 12-ти суток. Указано только время выполнения собственно расчетов. В случае необходимости выполнения расчетов с моделированием кавитации, суммарное время расчетов на тех же ресурсах может составить порядка 48 суток. Т.е. без использования достаточно высокопроизводительных вычислительных систем прогнозирование начала кавитации представляется нереальным.

Использование предложенного подхода определения начала кавитации для водометов других типов, например, струйных или с направляющим аппаратом вместо спрямляющего, вполне возможно. Однако может потребоваться выработка своих критериев определения начала кавитации по расчетным результатам или проверка предложенного. Для этого требуется проведение систематических расчетов и сопоставление их результатов с тестовыми экспериментами.

В дальнейшем необходимо проведение подобной работы применительно к натурным условиям. Однако эти работы затруднены отсутствием в настоящее время в отечественной практике результатов натурных наблюдений кавитации и невозможностью получения аналогичных материалов зарубежных гидродинамических центров.

Литература

1. Левковский Ю.Л. Шум гребных винтов. СПб: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. 184 с.
2. Перник А.Д. Проблемы кавитации. Л. «Судостроение», 1966. 439 с.

3. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. Пер. с англ. М.: Мир, 1974. 687с.
4. Sokolichin A., Eigenberger G., Lapin A., Lübert A. Dynamic numerical simulation of gas-liquid two-phase flows: Euler/Euler versus Euler/Lagrange // Chemical Eng. Science. 1997. Vol. 52. No. 4. Pp. 611–626.
5. Hirt, C.W.; Nichols, B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. 39 (1). P. 201–225.
6. Исаенко И.И., Махнов А.В., Смирнов Е.М., Шмидт А.А. Моделирование кавитации в высокоскоростных течениях в каналах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 1. С. 55 – 65. DOI: 10.18721/JPM.11106
7. Багаев Д.В., Егоров С.В., Лобачев М.П., Рудниченко А.А., Таранов А.Е. Валидация технологии численного моделирования кавитационных течений // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. 4(382). С. 46-56.
8. Водометный движитель насосного типа с коротким водоводом. Патент на изобретение РФ № 2537351 от 07.05.2013.
9. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994, Vol. 32. pp. 1598-1605.
10. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4. K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers (Editors), 2003 Begell house, Inc.
11. Sauer J. Instationaer kavitierende Stroemungen – Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing VOF und Blasendynamik, Dissertation, Universitaet Karlsruhe, 2000.
12. Багаев Д.В., Лобачев М.П., Чалов С.А., Расчет кавитационных явлений в вязкой жидкости // Тезисы докладов международной конференции по механике «VI Поляховские чтения». СПб., 2012. С. 114
13. Справочник по теории корабля / Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. Т 1. 768с.
14. Овчинников Н.А., Чалов С.А., «Использование пакета инженерного анализа STAR-CCM+ для определения характеристик схлопывания парового пузырька» // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. 78(362). С. 97-102.
15. Овчинников Н.А. Эффективность использования суперкомпьютера при решении задач вычислительной гидродинамики. // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности: Альманах. М.: Издательство Московского университета, 2014. С. 39-52.