

УДК 628.29

Значимость математического моделирования работы крупных насосных станций

Божьева С. М.^{1,*}, Ломакин В. О.²

* svetlana@pump.ru

¹ЗАО «Водоснабжение и водоотведение», Москва, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приводится современный подход к проектированию крупных насосных станций. Описывается конструктивное оформление заглубленной станции диаметром 26 метров, глубиной 13 метров, с погружными насосными агрегатами. Представлены результаты гидродинамического моделирования (CFD) конкретного объекта. Проводится анализ разработанной проектом приемной камеры с целью определения возможных проблем при эксплуатации насосной станции и предлагаются меры для улучшения условий ее работы. Приведено сравнение расчета минимальных уровней воды в насосных станциях по эмпирическим зависимостям и с помощью метода вычислительной гидродинамики. Обосновано применение гидродинамического моделирования для проверки и корректировки проектов крупных насосных станций как значительно более точного инструмента по сравнению с эмпирическими формулами, учитывающего все особенности объекта.

Ключевые слова: насосная станция, погружной насос, приемная камера, вычислительная гидродинамика, выравнивание потока, минимальный уровень воды, застойные зоны, воронкообразование

Введение

Насосные станции являются важнейшим элементом систем водоснабжения и водоотведения. От работы комплекса сооружений и оборудования насосных станций во многом зависит общая надежность и экономическая эффективность подачи или отведения воды.

При проектировании насосной станции требуется обеспечить благоприятные гидравлические условия для работы агрегатов, подробно изложенные в [1]. Поток воды к любому из насосов должен быть однородным и установившимся, без вихревых воронок и вовлечения воздуха в жидкость. При перекачке загрязненных вод конструкция приемного резервуара также должна препятствовать образованию осадка и поверхностной пены в приемной камере.

Согласно «ANSI/HI», 2012г. [2], проекты особо крупных или многонасосных станций рекомендуется проверять испытаниями на гидравлической или цифровой модели. Моделирование позволяет в полной мере оценить эффективность проектного решения в соответствии с гидродинамическим анализом насосной станции.

К настоящему моменту существуют различные рекомендации по проектированию насосных станций, содержащие общие требования конструктивного оформления приемных камер и машзалов вне зависимости от типов применяемых насосов и их производителей [3, 4, 5]. К сожалению, не все проекты удается выполнять в соответствии с ними, так как зачастую существуют серьезные ограничения в выделенных площадях, существующих геодезических условиях, строительных требований и пр. И для таких проектов моделирование работы будущей станции становится необходимостью.

Рассматриваемый проект заглубленной канализационной насосной станции (КНС) с погружными агрегатами относится именно к крупным многонасосным нестандартным объектам. Для обеспечения надежности и бесперебойности эксплуатации КНС было принято решение о проведении математического моделирования ее работы с целью выявления и корректировки возможных недочетов принятых проектных решений.

Совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана была построена и рассчитана математическая модель, основанная на предоставленной проектной документации.

1. Исходные данные

Проект КНС, представленный к рассмотрению, включает мероприятия по выравниванию потока, поступающего от подводящего коллектора к насосным агрегатам: установлена водоотбойная стенка с четырьмя окнами на уровне 1,2 м от дна станции, предусмотрен уклон дна приемной камеры к всасывающим патрубкам насосов, между агрегатами установлены перегородки, позволяющие исключить взаимное влияние насосов друг на друга. Станция оборудована восьмью насосными агрегатами (из них 6 рабочих). Расчетная производительность одного насоса – 3330 м³/ч. Диаметр всасывающего патрубка – 800 мм.

Станция имеет два отделения, соединенных между собой прямоугольным проемом. Проем перекрывается шиберами. Расстояние между осями перегородок, разделяющих насосные агрегаты, – 2,3 м.

Насосные агрегаты установлены напорными патрубками и трубопроводами навстречу подводящему коллектору.

Первоначально в проекте минимальный уровень воды был рассчитан на основании СП 32.13330.2012 п. 8.2.4, указывающем, что заглубление всасывающего патрубка относительно минимального уровня жидкости следует принимать не менее, чем на два его диаметра (далее – D) [6]. Расстояние от всасывающего патрубка до дна резервуара принимается порядка 0,3...0,5D. Таким образом, в проекте минимальный уровень воды был принят минимальным, $2,5D=2,0$ метра от дна резервуара.

Минимальный уровень воды над всасывающим патрубком в соответствии с «ANSI/HI» (2012г.) рассчитывается по следующей методике:

$$S = D(1 + 2.3F),$$

где

S – минимальный уровень воды над всасывающим патрубком (отсчитывается от оси горизонтального патрубка или нижней части вертикального подвода), м;

D – диаметр всасывающего патрубка (в случае прямоугольного подвода рассчитывается диаметр эквивалентного круглого сечения), м;

F – число Фруда, $F = V/(gD)^{0.5}$, где V – скорость входа жидкости в патрубок, м/с.

Результаты расчета величины минимального уровня воды над всасывающим патрубком: подача, $Q = 3\,330$ м³/ч; диаметр всаса, $D = 0,8$ м; скорость воды, $V = 1,84$ м/с; число Фруда, $F = 0,66$; уровень воды над всасывающим патрубком, $S = 2,01$ м. В соответствии с данной методикой расчета, минимальный уровень воды от дна резервуара должен составлять не менее $(2,01\text{м} + 0,5D) = 2,41$ м.

Полученная величина 2,41м не противоречит требованиям СП 32.13330.2012, но требует углубления станции по отношению к первоначальному проекту на 0,41м, что приведет к увеличению объема приемного резервуара и, соответственно, капитальных затрат на строительство.

От завода-изготовителя насосных агрегатов были получены рекомендации по организации приемной камеры, обеспечивающей бесперебойную работу насосных агрегатов при пониженном уровне воды в приемной камере (2,0 метра против 2,41 метра на основании «ANSI/HI»). Указанный уровень воды должен обеспечивать бескавитационную работу насосных агрегатов, а также должен быть достаточен для предотвращения воронкообразования при работе агрегатов. Дополнительно по рекомендации производителя насосного оборудования на дне резервуара непосредственно под всасывающими патрубками предусмотрены потоконаправляющие элементы.

Приведенные в СП 32.13330.2012 [6] и в «ANSI/HI» (2012г.) [2] методы определения и расчета требуемого минимального уровня воды крайне неточны, т.к. не учитывают множество различных факторов, касающихся станции в целом: форму и габариты приемного резервуара, расположение насосов и их взаимное влияние, наличие перегородок и потоконаправляющих элементов, возможные режимы работы.

Рекомендации по устройству приемной камеры насосной станции также не дают однозначного ответа о размещении технологического оборудования, организации подвода перекачиваемой жидкости к всасывающим патрубкам насосов и пр.

Гидродинамическое моделирование, применяемое для решения сходных задач, описанных в [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], позволяет провести расчеты с учетом особенностей конструкции насосной станции и получить наиболее приближенные к реальности результаты, увидеть общую картину работы насосной станции при различных режимах эксплуатации, а также проверить и откорректировать принятые проектные решения для обеспечения бесперебойной работы станции и системы в целом.

2. Цель моделирования

Надежная и экономичная работа насосной станции возможна при выполнении как минимум двух условий в отношении ее приемного резервуара. Поток жидкости в нем должен быть стабильным и равномерным, чтобы исключить условия для попадания воздуха в насосы, и одновременно быстрым во избежание образования застойных зон, а в случае перекачки загрязненных вод — во избежание скопления осадка и плавающих веществ. Поэтому размеры приемного резервуара должны быть достаточно велики, чтобы обеспечить насосам оптимальный гидравлический режим, и одновременно малы, чтобы исключить застои и засоры.

Цель математического моделирования работы представленной насосной станции — анализ разработанной конструкции приемной камеры, проверка отсутствия воронкообразования при принятом проектом минимальном уровне воды, выявление застойных и вихревых зон, возможных сложностей в эксплуатации объекта с последующей корректировкой проектной документации (если необходимо) и регламентов эксплуатации насосных агрегатов и станции в целом.

3. Построение модели

В качестве исходной модели была выдана 3D модель насосной станции.

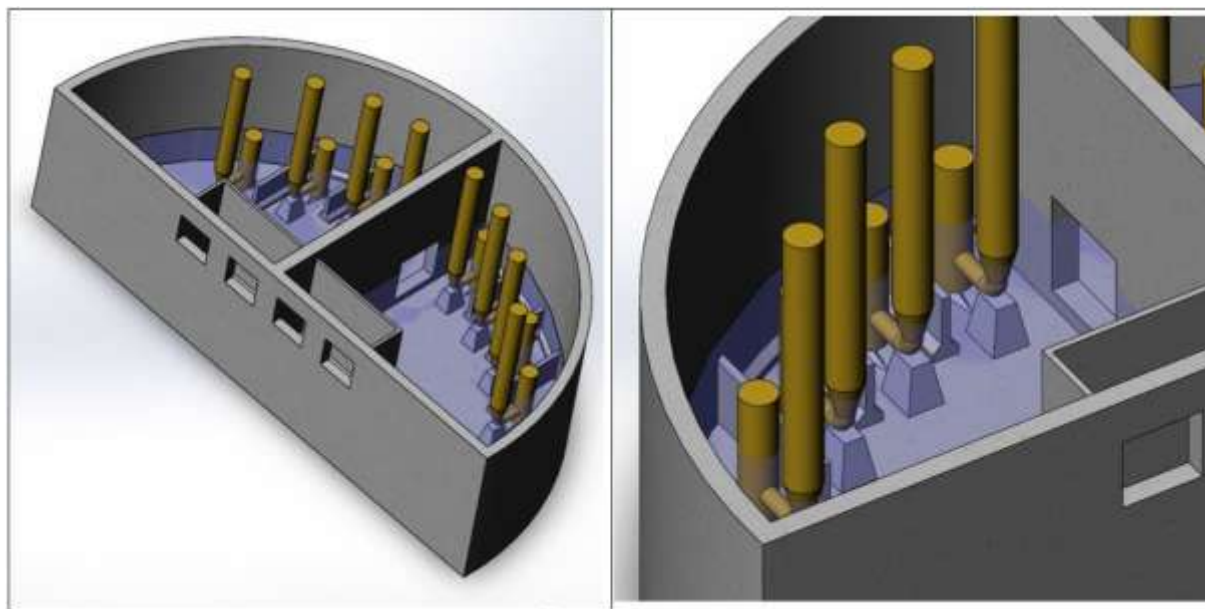


Рис.1. 3D модель насосной станции

Для удобства насосным агрегатам и отделениям насосной станции присвоены порядковые номера (рис. 2).

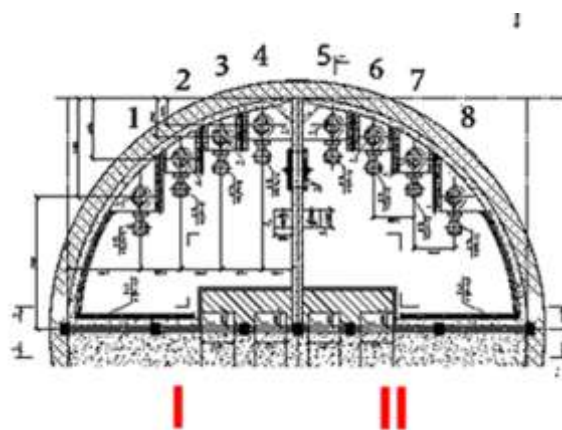


Рис. 2. Порядковые номера насосов (1...8) и номера отделений (I и II)

Для проведения расчетов использовался программный пакет STAR-CCM+, работа с которым рассматривалась в [15] для моделирования проточной части насосного агрегата. Для расчетов в этом пакете необходимо из данной модели получить расчетную область. При решении данной задачи использовались разные математические модели физических процессов в насосной станции. Для получения данных о поведении жидкости в станции необходимо моделировать многофазное турбулентное течение жидкости.

В процессе расчета использовались следующие уравнения гидродинамики:

Уравнение неразрывности жидкой среды:

$$\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} = 0,$$

$\bar{u}_i$ – осредненные по времени проекции скоростей жидкости на соответствующие оси.

Так как для моделирования турбулентного течения в данной работе использовалась модель турбулентности из класса RANS (Модели турбулентности на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса) все рассчитываемые величины являются осредненными по времени.

Уравнение изменения количества движения осредненное по времени:

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[T_{ij}^{(v)} - \rho \langle u_i u_j \rangle \right],$$

где $\bar{u}_i$, $\bar{p}$ – осредненные скорость и давление;

$\tilde{T}_{ij}^{(v)} = 2\mu \tilde{s}_{ij}$ – тензор вязких напряжений для несжимаемой жидкости;

$\tilde{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right]$ – тензор скорости деформации;

$\rho \langle u_i u_j \rangle$ – Рейнольдсовы напряжения

Система уравнений Рейнольдса является незамкнутой в связи с наличием неизвестных Рейнольдсовых напряжений. Замыкание системы производится с использованием k- ω модели турбулентности.

Модель дополняется двумя дополнительными уравнениями переноса кинетической энергии турбулентности и относительной скорости диссипации этой энергии:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \cdot S^2 - \beta \cdot \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] +$$

$$+ 2 \cdot (1 - F_1) \cdot \sigma_{\omega 2} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

Для моделирования двухфазности среды применяется подход известный как VOF (Volume of Fluid) [16].

В методе VOF многофазная среда рассматривается, как одиночная текучая среда, чьи свойства изменяются согласно объемной доле каждой из присутствующих фаз:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V};$$

V_i – Объем каждой фазы,

V – Объем ячейки.

Уравнение для массовой концентрации каждой из фаз:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i V) = 0.$$

При численном моделировании использовался метод контрольного объема. Суть метода состоит в следующем:

Расчетная область (рис. 3) разбивается на множество мелких ячеек. Размеры ячеек колеблются от 38 мм до 150 мм в зависимости от геометрического расположения в станции. Каждая ячейка представляет собой замкнутую область течения жидкости или газа, для которой производится поиск полей макроскопических величин (например, скорости, давления), описывающих состояние среды во времени и удовлетворяющих определенным законам, сформулированным математически.

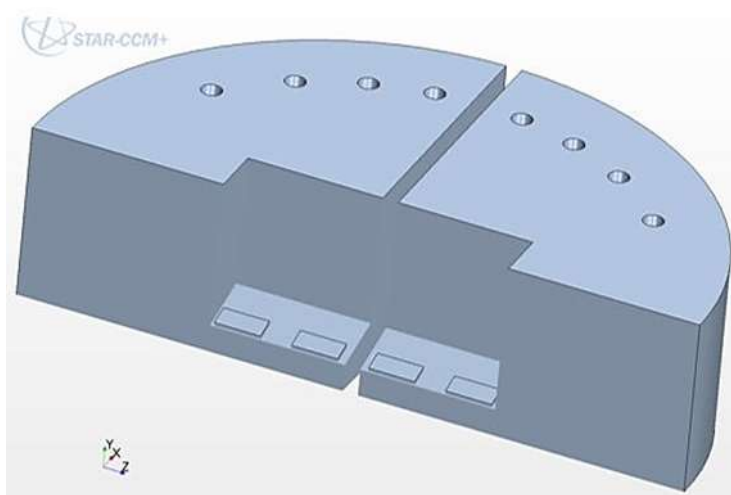


Рис. 3. 3D модель расчётной области насосной станции

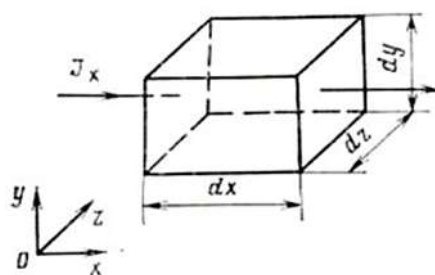


Рис. 4. Баланс потоков через контрольный объём

Расчетная сетка имеет различную топологию. В ядре потока ячейки представляют из себя многогранники различной формы и размеров, вблизи твердых стенок ячейки представляют из себя многогранные призмы, вытянутые в направлении перпендикулярном стенке (такой подход при построении стеки позволяет рационально распределить расчётные ячейки вблизи твердых стенок, где наблюдается изменение скорости потока с большим градиентом в перпендикулярном стенке направлении). При данном расчете количество ячеек расчетной сетки составило около 3 млн. ячеек.

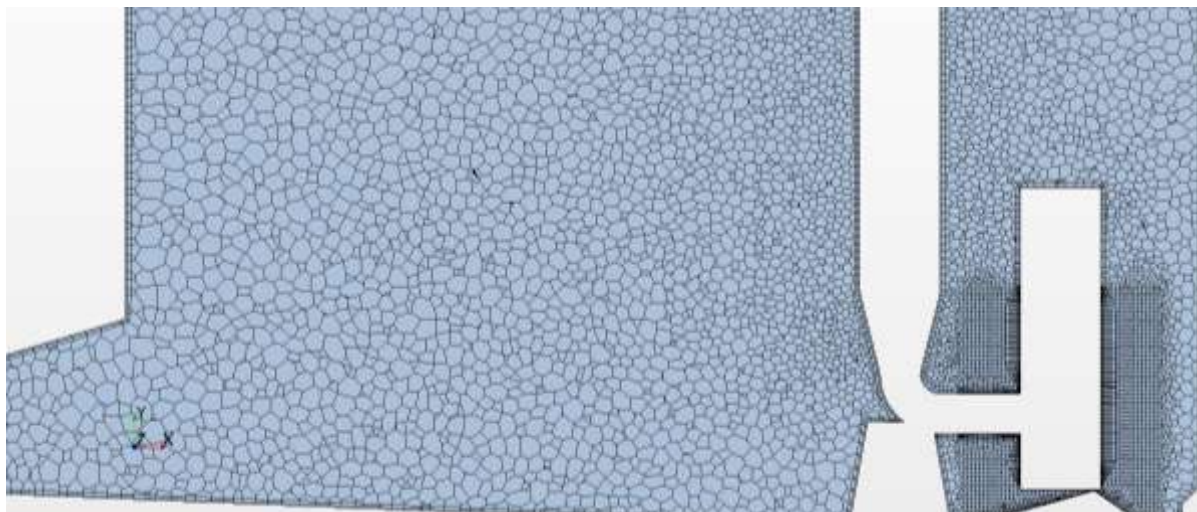


Рис. 5. Расчетная стенка в сечении (насос №4)



Рис. 6. Расчетная сетка на входе в насос (насос №4)

Для решения поставленной задачи необходимо было поставить начальные и граничные условия. В качестве начальных условий задавался уровень жидкости в станции. Расчеты проводились для уровней 0,8 м, 1,5 м и 2 м от дна приемного резервуара (далее уровень воды в станции указывается от дна).

Граничные условия были представлены тремя величинами:

- Давление на верхней стенке модели, равное атмосферному;
- Скорость на входе в станцию;
- Скорость на входе в насос.

Стоит отметить, что скорость на входе в насос задавалась как совокупность окружной и осевой составляющей. При этом окружная составляющая характеризовала закрутку потока на входе в насос (закрутка потока за счет вращения рабочего колеса), а осевая – расход по нормали к входному сечению.

4. Результаты моделирования

Результаты моделирования приведены в виде картин течения жидкости в насосной станции при разных режимах работы.

Режим 1. Уровень жидкости в станции – 2 м, количество насосов в работе – 6 (рис. 7).

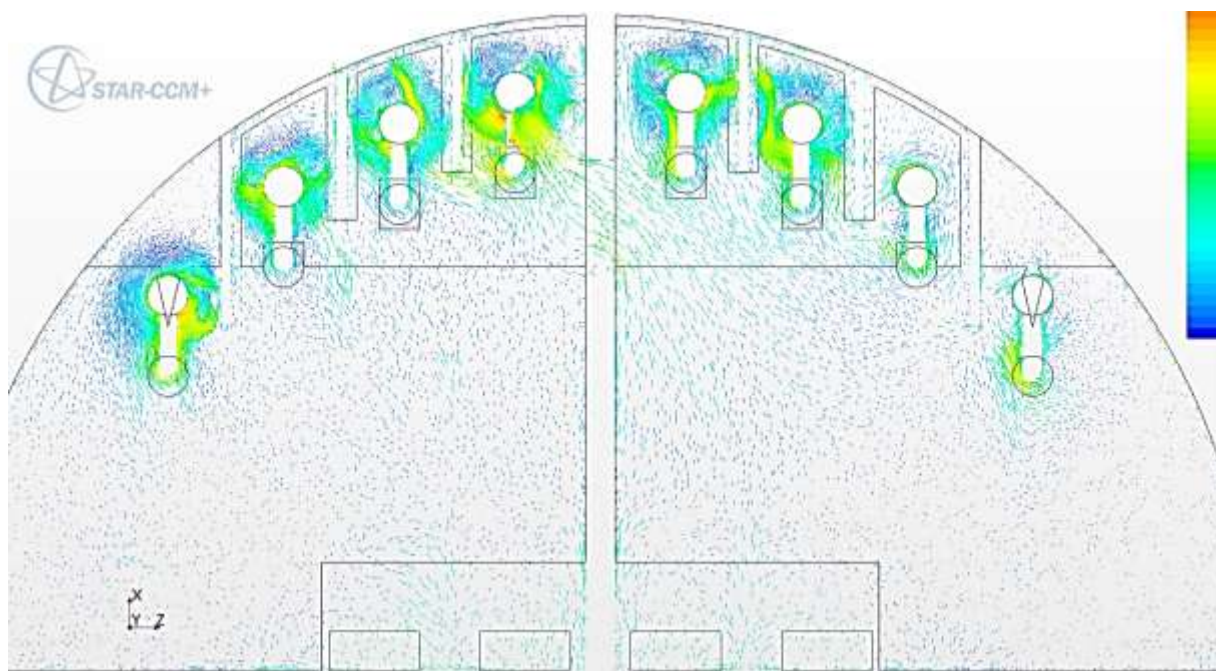


Рис. 7. Распределение скоростей в станции (в плане) при уровне воды 2 м и шести включенных насосах (п.н. (порядковые номера): 1...6)

При таком режиме работы наиболее нагруженным является насосный агрегат №4. Отделение I перекачивает большее количество поступающих стоков (4 насосных агрегата в работе против двух в отделении II), в связи с чем происходит перетекание стоков из отделения II в отделение I через соединяющий их проем. Близкое расположение проема к

насосным агрегатам приводит к резкому изменению направления движения стоков у насосов №4 и №5, нарушается условие равномерного подвода воды к агрегатам, рядом со стенкой образуются завихрения потока.

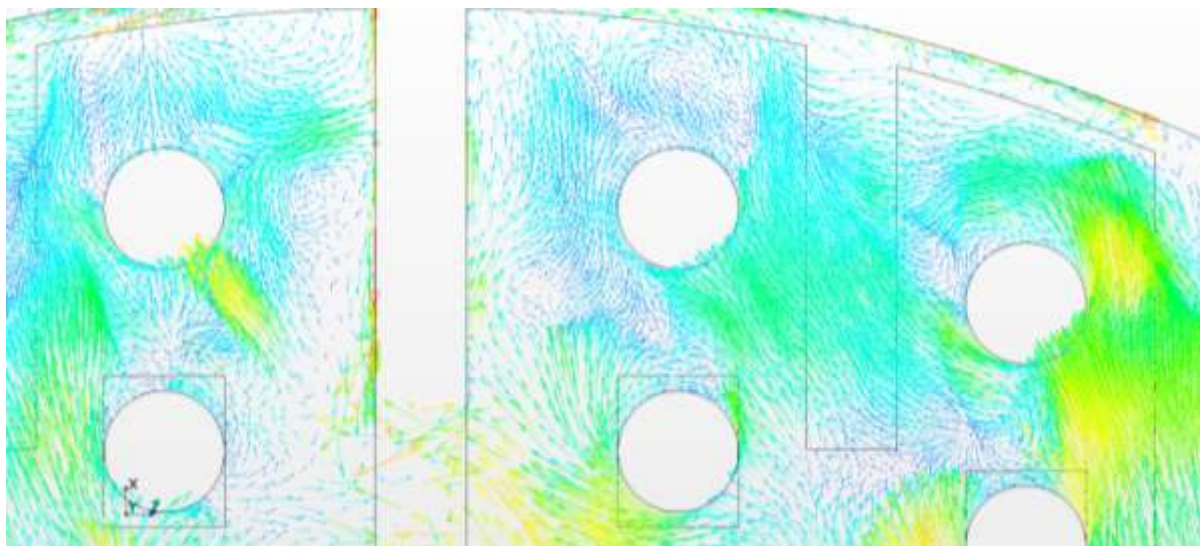


Рис. 8. Распределение скоростей вблизи насосных агрегатов №4, 5, 6 (в плане) при уровне воды 2 м и шести включенных насосах (п.н.: 1...6)

На рис. 8 хорошо видны небольшие вихри, вызванные изменениями направления движения воды в проеме и вокруг напорных трубопроводов и насосных агрегатов. Но развития вглубь станции эти вихри не имеют, уровень воды (2 м) достаточен для предотвращения воронкообразования.

Обтекание потоком напорного трубопровода и направляющих для установки насосов может привести к закрутке поверхностного слоя воды. При наличии плавающего мусора и/или волокнистых включений в перекачиваемой среде возможно засорение направляющих, что усложнит монтаж/демонтаж насосных агрегатов, а также приведет к увеличению сопротивления на входе в насос и ухудшению условий работы агрегатов.

На рис. 9 и 10 представлено распределение скоростей вблизи насосных агрегатов №4 и №2 соответственно. На входе в насос №4, установленный около проема, соединяющего отделения приемной камеры, распределение скоростей неосесимметричное, имеет место закрутка потока во всасе агрегата, что может существенно сказаться на его рабочих параметрах.

У насоса №2, расположенного на удалении от проема, распределение скоростей во всасе осесимметричное, подвод воды осуществляется правильно. Также следует отметить, что тип потоконаправляющих элементов, установленных на дне резервуара, выбран верно и обеспечивает выравнивание потока во входе в насос.

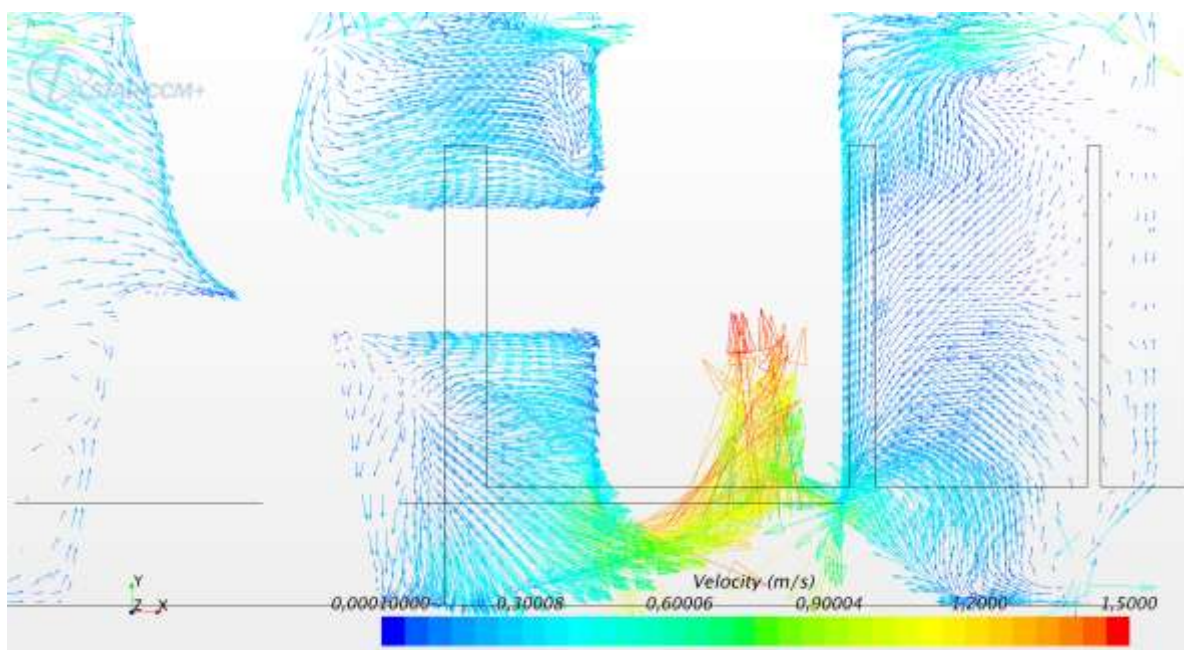


Рис. 9. Распределение скоростей вблизи насосного агрегата №4 (в разрезе) при уровне воды 2 м и шести включенных насосах (п.н.: 1...6)

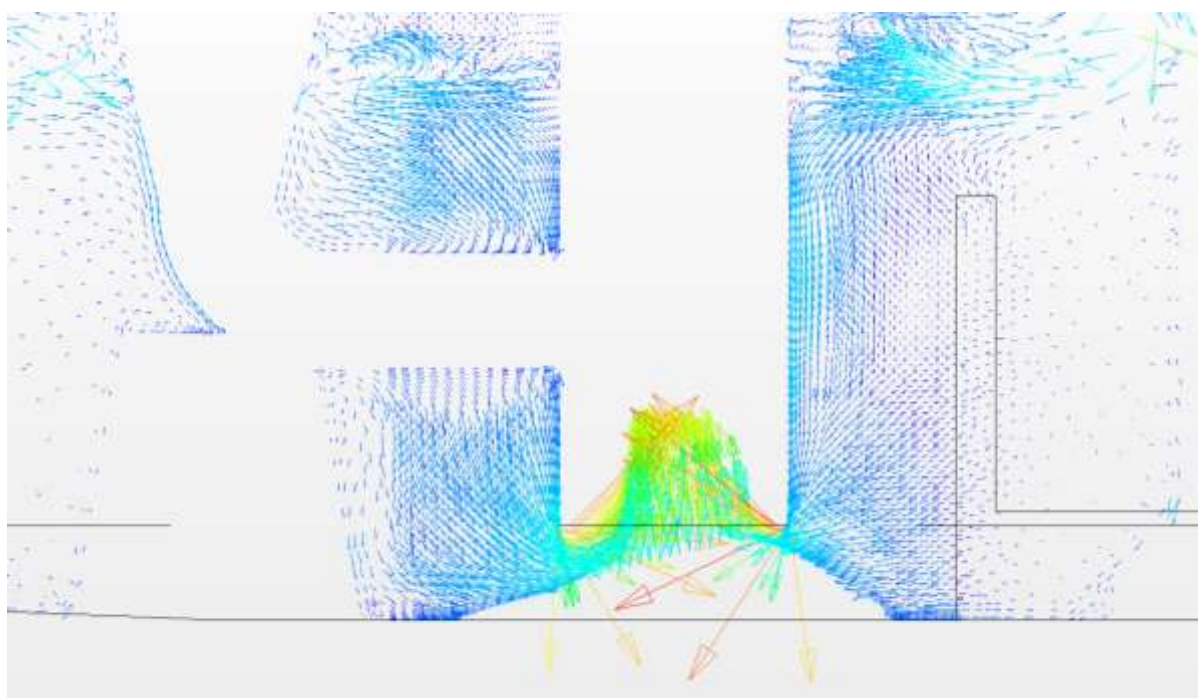


Рис. 10. Распределение скоростей вблизи насосного агрегата №2 (в разрезе) при уровне воды 2 м и шести включенных насосах (п.н.: 1...6)

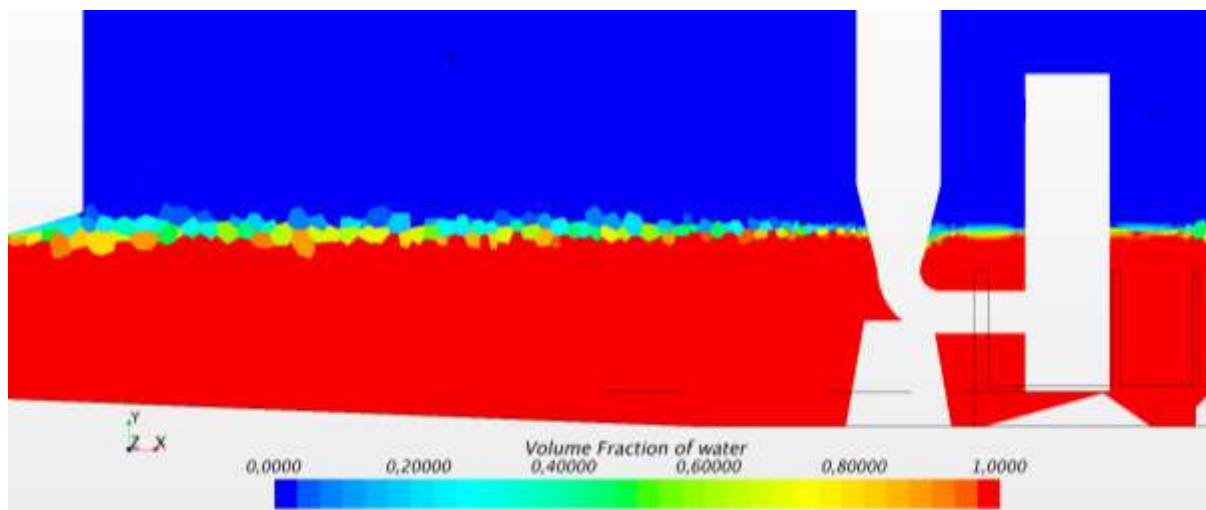


Рис. 11. Распределение концентраций (красный – вода, синий - воздух) фаз в разрезе вблизи насоса №4 при уровне воды 2 м и шести включенных насосах (п.н.: 1...6)

При уровне воды 2 м отсутствует воронкообразование.

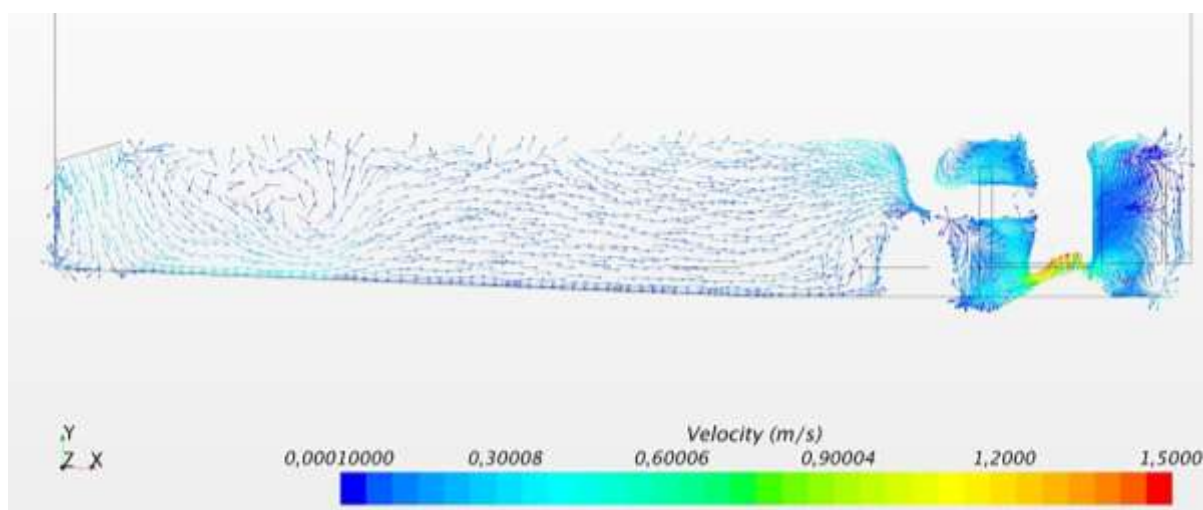


Рис. 12. Направление движения жидкости в станции в разрезе вблизи насоса №4 при уровне воды 2 м и шести включенных насосах (п.н.: 1...6)

Из рис. 12 видно, что поступающий поток сточных вод по длине приемной камеры выпрямляется, движение воды равномерно по всей глубине. Выбранные уклон дна и расстояние от распределительных окон до всаса насосного агрегата обеспечивают равномерное движение стоков в приемной камере и защиту от осаждения взвешенных веществ. Однако в углах станции (рис. 7) и у резервных насосов (№7 и №8) видны застойные зоны, где возможно осаждение взвешенных частиц и застаивание поверхностной пены.

Режим 2. Уровень жидкости в станции – 2 м, количество насосов в работе – 1 (№4).

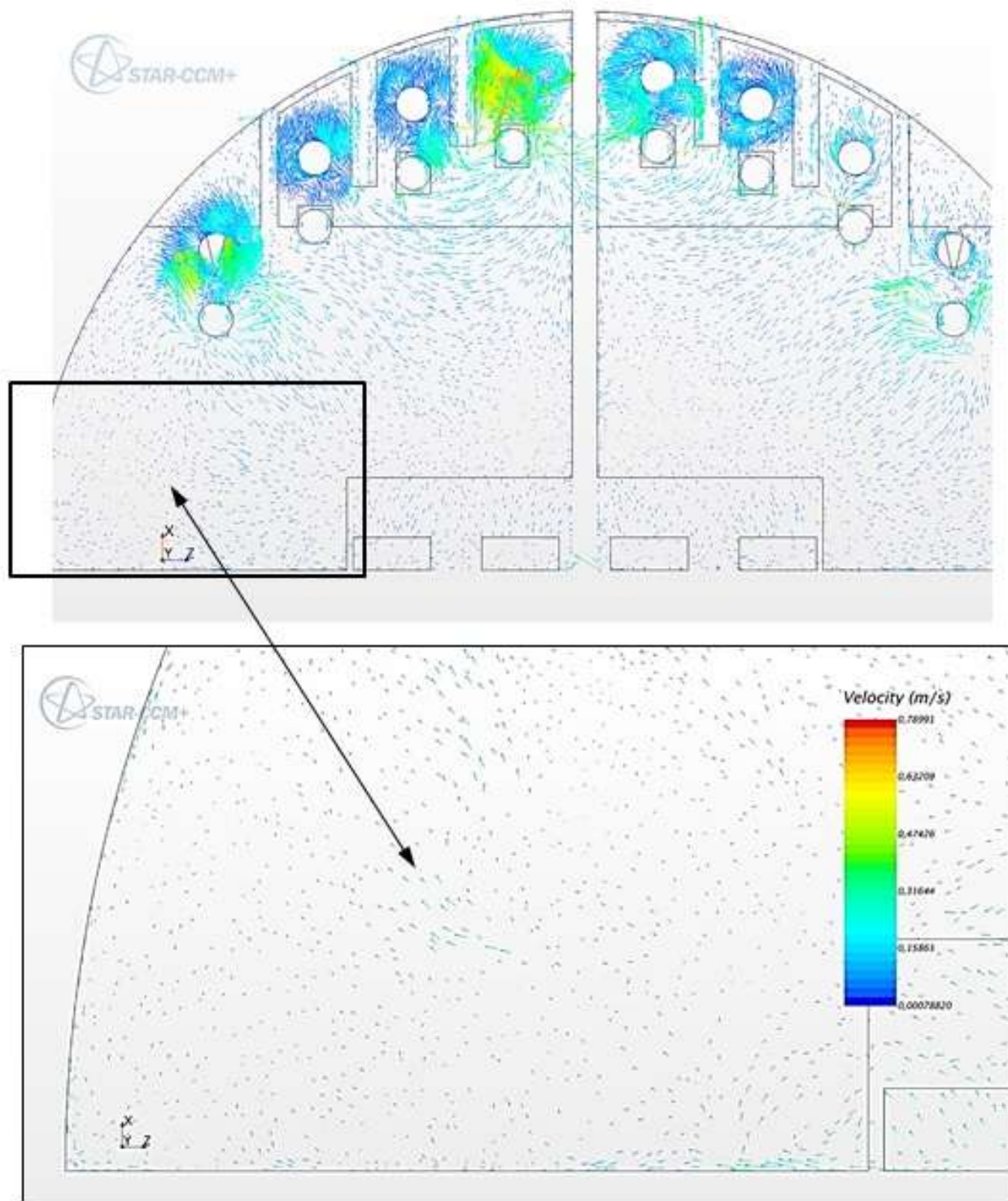


Рис. 13. Распределение скоростей в плане станции при уровне воды 2 м и одном включенном насосе (№4). В углах станции видны застойные зоны

При работе одного насосного агрегата наличие застойных зон более выражено.

Подвод воды к рабочему насосному агрегату (№4) неравномерный, достаточно короткие перегородки между насосами и близко расположенный проем между отделениями станции не позволяют выпрямить поток.

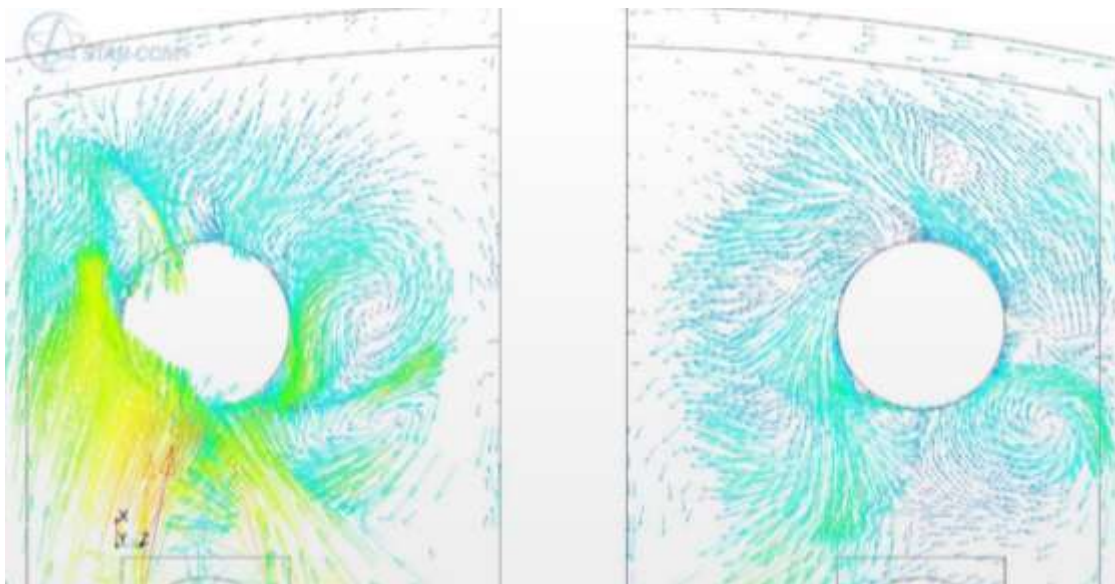


Рис. 14. Распределение скоростей в плане станции вблизи насосных агрегатов при уровне воды 2 м и одном включенном насосе (№4)

На рис. 14 отчетливо просматривается неравномерность притока перекачиваемой жидкости относительно оси насоса, скорости слева от напорного трубопровода значительно выше, чем скорости справа от него, направления скоростей различны. У насоса №4 также видны застойные зоны у стены стакана приемной камеры.

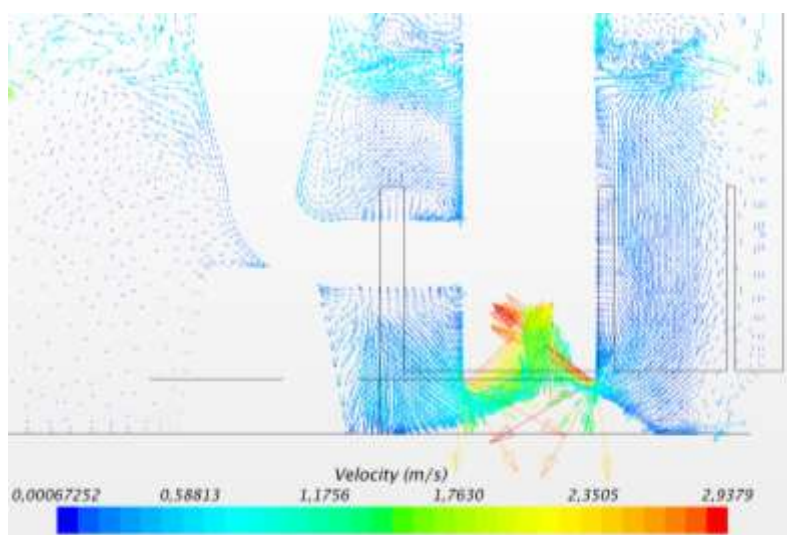


Рис. 15. Распределение скоростей в разрезе вблизи насоса №4 при уровне воды 2 м и одном включенном насосе (№4)

При работе одного насосного агрегата распределение скоростей во входе в насос несимметричное, но по сравнению с Режимом 1 (рис. 9) условия эксплуатации более приемлемые.

Режим 3. Уровень жидкости в станции – 1,5 м, количество насосов в работе – 6.

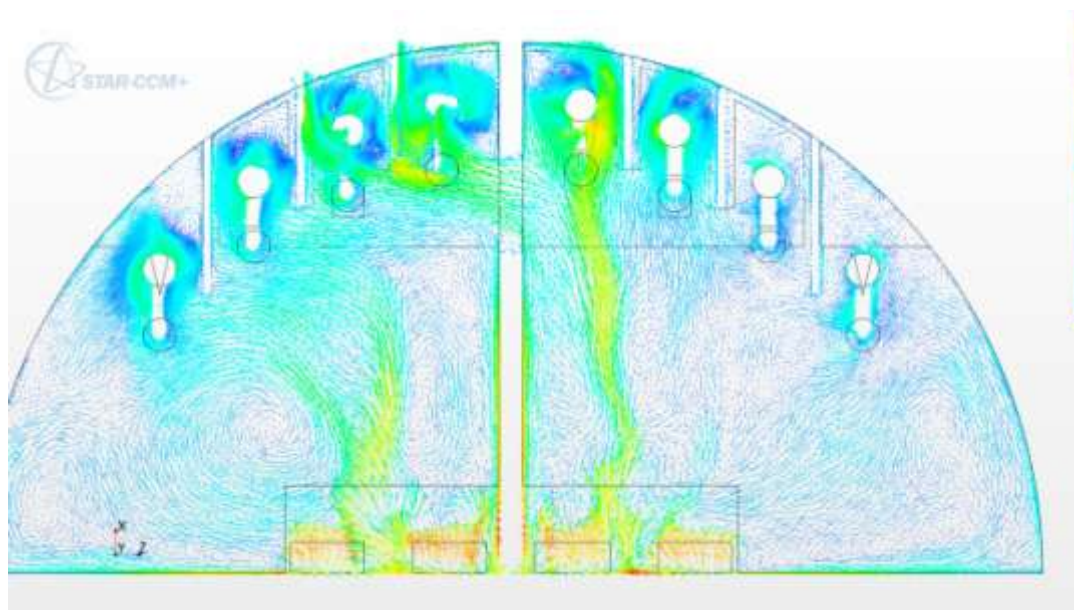


Рис. 16. Распределение скоростей в плане станции при уровне воды 1,5 м и шести включенных насосах (п.н. 1...6)

При снижении уровня до 1,5 м от дна приемного резервуара скорости движения воды значительно увеличиваются, поток в станции становится более неравномерным. В застойных зонах образуются пристеночные токи жидкости в направлении насосов (рис. 17).

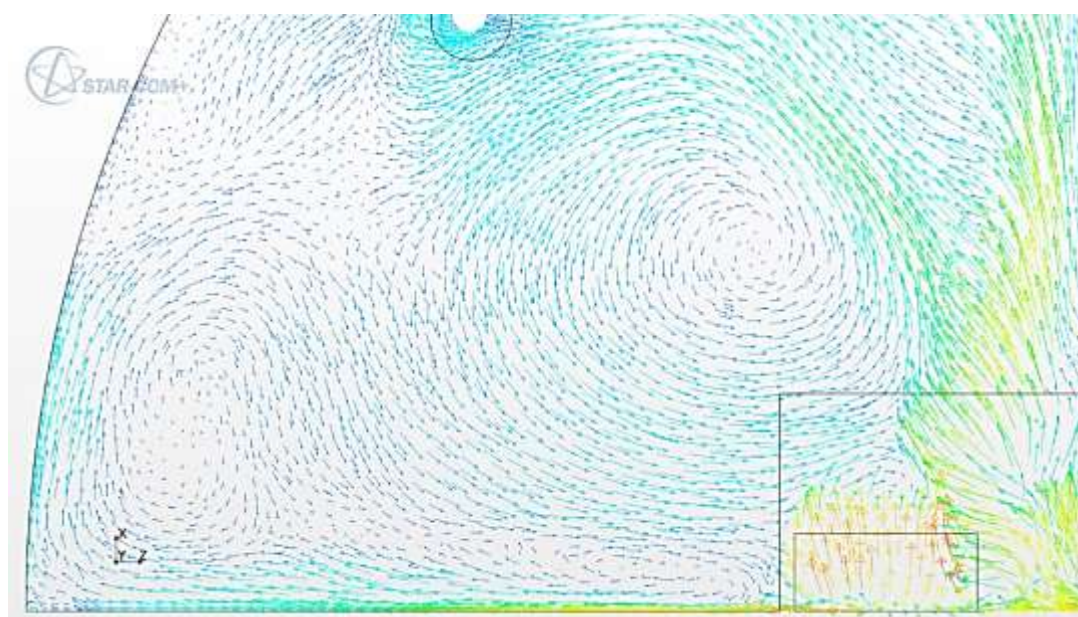


Рис. 17. Угол приемного резервуара станции в плане при уровне воды 1,5 м и шести включенных насосах (п.н. 1...6)

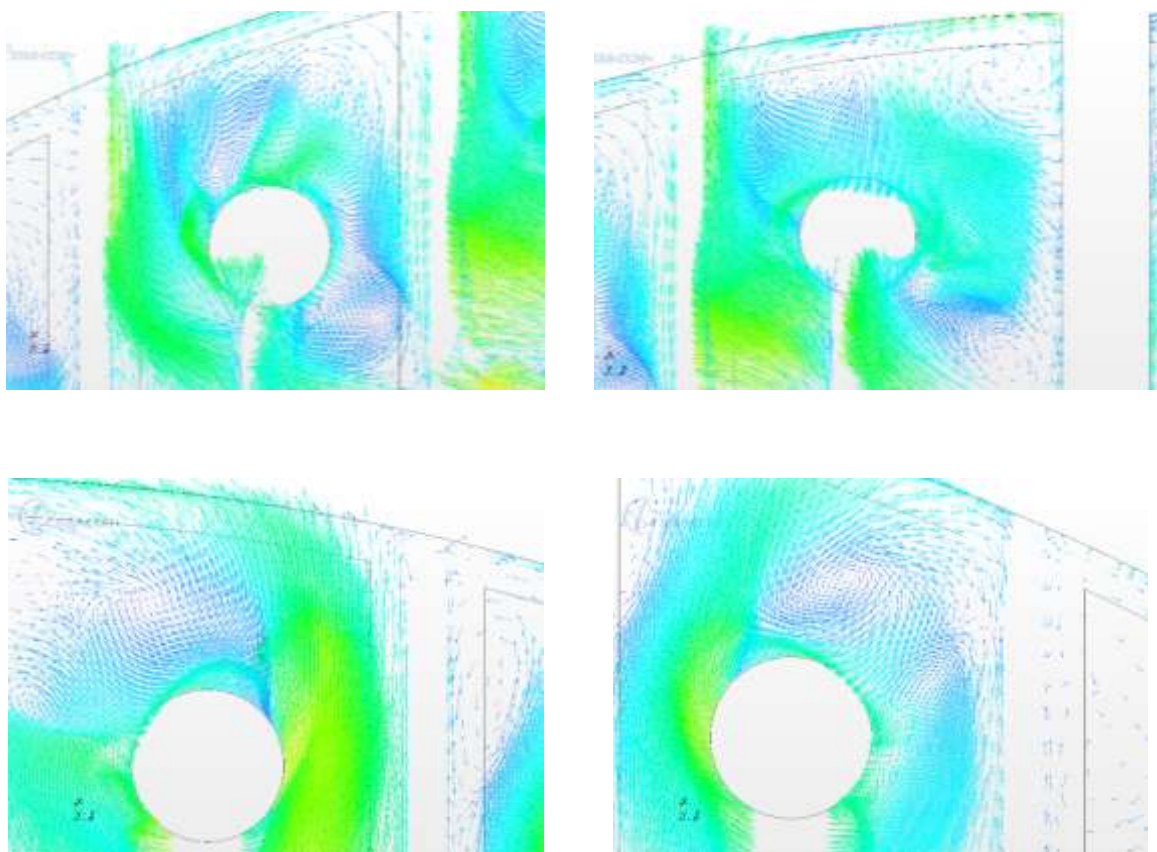


Рис. 18. Распределение скоростей в плане станции вблизи насосов (п.н. 3, 4, 5, 6) при уровне воды 1,5 м и шести включенных насосах (п.н. 1...6)

Вблизи насосных агрегатов видны многочисленные вихревые зоны (рис. 18), в которых создаются нисходящие потоки жидкости ко всасу насоса.

На входе насоса №4, установленного около проема, распределение скоростей неосесимметричное (рис. 19).

Вихревые зоны на поверхности воды не развиваются в поверхностные воронки, но при незначительном изменении условий эксплуатации (увеличение сопротивления на входе в насос или по ходу движения воды вблизи насоса) возможен захват воздуха насосом или даже появление явно выраженной поверхностной воронки.

Кратковременная эксплуатация насосных агрегатов в таком режиме позволяет очистить застойные зоны от плавающего мусора и пены, но при этом осадок, образующийся в этих застойных зонах, таким образом удалить не удастся.

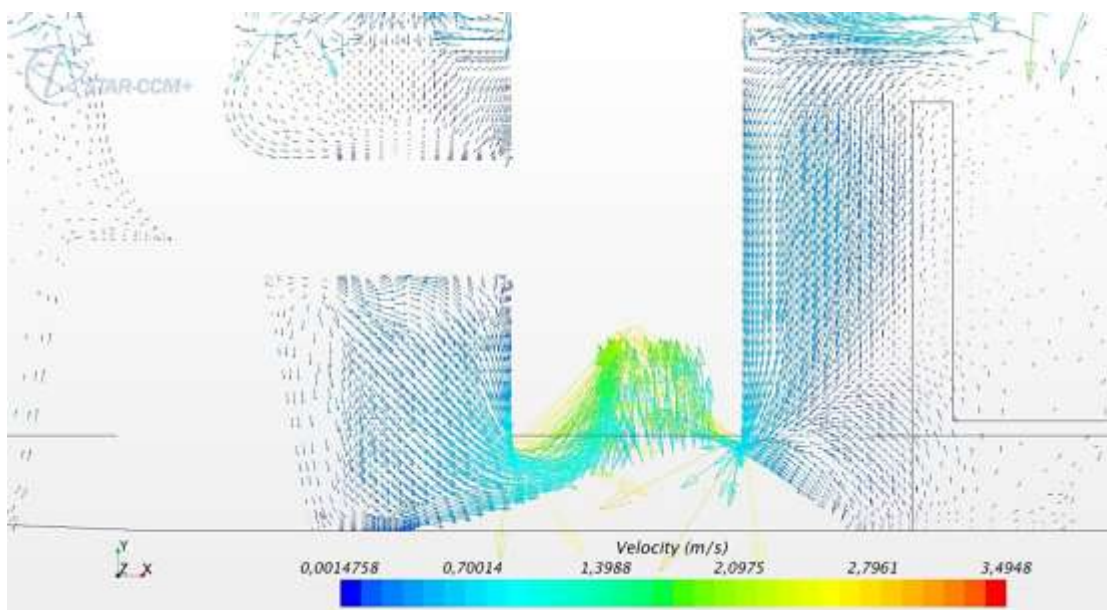


Рис. 19. Распределение скоростей в разрезе вблизи насоса №4 при уровне воды 1,5 м и шести включенных насосах (п.н. 1...6)

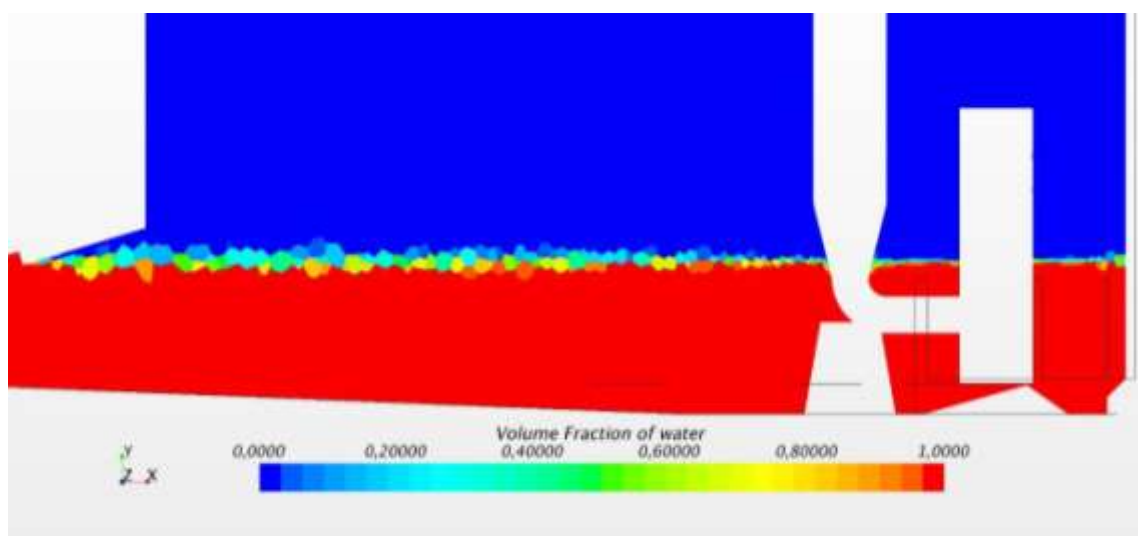


Рис. 20. Распределение концентраций (красный – вода, синий - воздух) фаз в разрезе вблизи насоса №4 при уровне воды 1,5 м и шести включенных насосах

Режим 4. Уровень жидкости в станции – 1,2 м, количество насосов в работе – 6.

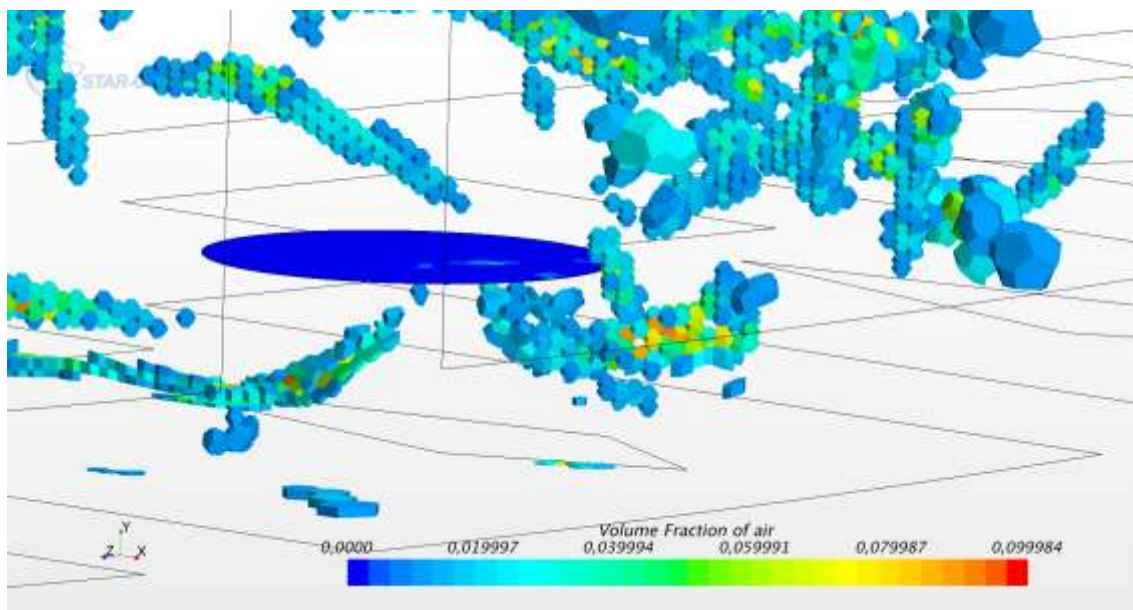


Рис. 21. Множественные развитые поверхностные воронки вблизи насоса №4 при уровне воды 1,2 м и шести включенных насосах. Синим показан всасывающий патрубок насоса, цветом указаны расчетные ячейки, где концентрация воздуха составляет от 1 до 9,9 %

Режим 5. Уровень жидкости в станции – 0,8 м, количество насосов в работе – 6.

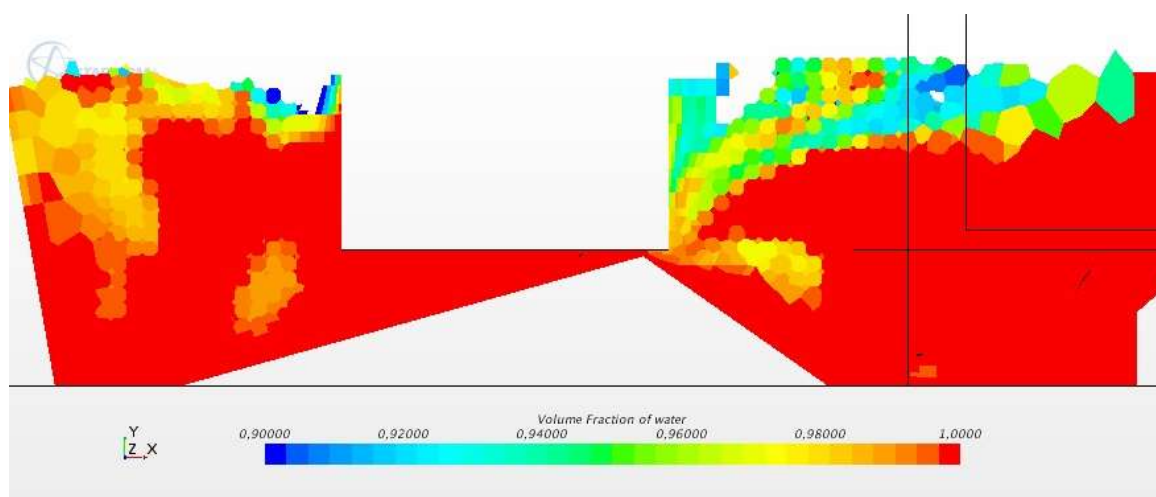


Рис. 22. Распределение концентраций (красный – вода, синий - воздух) фаз в разрезе станции вблизи насоса №4 при уровне воды 0,8 м и шести включенных насосах. Насосный агрегат работает практически на воздухе

5. Анализ результатов моделирования

Результаты моделирования подтверждают корректность основных конструктивных решений, принятых при проектировании рассматриваемой КНС:

1. Насосные агрегаты разделены потоконаправляющими стенками, что уменьшает их взаимное влияние;

2. Конструкция потоконаправляющих элементов, установленных под всасывающими патрубками насосов, позволяет выровнять поток на входе у насосов, удаленных от проема, соединяющего отделения приемной камеры;
3. Расстояние от подвода стоков в приемную камеру до всасывающих патрубков насосов и угол уклона дна достаточны для выравнивания потока;
4. Расчетный минимальный уровень воды (2 м) при представленном проекте решения обеспечивает работу насосного агрегата без кавитации и воронкообразования.
5. Для обеспечения выравнивания потока окна в водоотбойной стенке должны быть расположены ниже уровня воды. В проекте окна расположены на высоте 1,2 м от дна станции, что позволяет работу в режиме кратковременного снижения минимального уровня воды в станции до 1,5 м.
6. При уровне воды 1,5 м появляются поверхностные вихри, способные развиваться в поверхностные воронки при незначительных изменениях условий эксплуатации. Развитые поверхностные воронки появляются при уровне 1,2 м от дна станции.
7. При уровне 1,5 м приток стоков с поверхности приемной камере к всасу насоса значительно интенсифицируется (по сравнению с эксплуатацией при минимальном уровне в приемной камере, равном 2 м). Кратковременная работа агрегатов в таком режиме способствует сбору плавающего мусора и пены с поверхности воды в приемной камере.
8. В углах приемной камеры имеются застойные зоны. Работа насосных агрегатов при уровне в камере 1,5 м будет недостаточной для удаления осадка из застойных зон.

Для улучшения условий эксплуатации насосной станции предложено предусмотреть следующие меры:

1. Уменьшить расстояние между перегородками, разделяющими насосные агрегаты (обычно рекомендуют выбирать это расстояние в свету равным двум диаметрам всаса насоса), и между насосным агрегатом и стеной стакана насосной станции. Это позволит уменьшить зоны появления и развития вихрей, уменьшит вероятность появления воронок.
2. Перенести проем, соединяющий отделения приемной камеры, ближе к подводящим каналам и водоотбойной стенке. Это позволит выровнять поток у насосных агрегатов №4 и №5 (рис. 7-10), улучшить условия работы, уменьшить вероятность закрутки потока на входе в насос.
3. В конструкции водоотбойной стенки предусмотреть места выхода плавающего мусора, который может попасть в каналы и в пространство приемной камеры, ограниченное водоотбойной стенкой. Либо предусмотреть регламент удаления возможных плавающих включений из этой области насосной станции.
4. Установка напорных патрубков, направляющих и трубопроводов ближе к подводящим каналам, чем насосные агрегаты, может привести к засорению узла монтажа/демонтажа агрегата, увеличению сопротивления на входе в насосный агрегат и ухудшению условий работы насоса (воронкообразование, кавитация, снижение

развиваемых параметров насосного агрегата). Необходимо предусмотреть регламент периодической проверки и очистки данного узла.

5. Необходимо предусмотреть регламент очистки застойных зон от осадка либо предусмотреть конструктивные доработки, исключающие скопление осадка в углах и застойных зонах приемного резервуара.

Выводы

1. Расчет минимальных уровней воды в насосных станциях по эмпирическим зависимостям может содержать существенную погрешность, возникающую в связи с отсутствием учёта конкретных геометрических и гидродинамических характеристики станции.
2. Гидродинамическое моделирование позволяет спрогнозировать поведение воды в станции в различных режимах работы насосов и предсказать воронкообразование с попаданием воздуха в насос, наличие нестационарных вихревых структур на входе в насос, наличие застойных зон в станции и т.п.
3. Проведение гидродинамического моделирования является желательной процедурой при проектировании крупных гидротехнических сооружений, так как позволяет на этапе проектирования с минимальными затратами ресурсов выявить все ошибки и недочеты проекта.

Список литературы

1. Березин С.Е. Насосные станции с погружными насосами. Расчеты и конструирование. М.: Стройиздат, 2008. 160 с.
2. Лихачев Н.И., Ларин И.И., Хаскин С.А. и др. Канализация населенных мест и промышленных предприятий / под общ. ред. Самохина В.Н. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1981. 639 с. (Справочник проектировщика)
3. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. Учебник для машиностроительных вузов. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
4. Баженов В.И. Математическое моделирование гидродинамических и водоочистных процессов // Яковлевские чтения. 9-я научно-техническая конференция: сборник докладов. Москва, 2014.
5. Баженов В.И., Петров В.И., Бухаров К.Д., Иванов А.В., Филиппов Г.Г. Разработка и численное моделирование рыбозащитных сооружений на основе потокообразующих устройств // Гидротехника, 2014. № 1 (34). С. 21-28.
6. Баженов В.И., Эпов А.Н., Гусаров О.С. Применение метода компьютерной симуляции гидродинамики потоков (CFD) для оптимизации конструкции аэротенка // Водоснабжение и канализация, 2009. №3. С. 47-55.
7. American National Standard for Pump Intake Design. ANSI/HI, 2012.

8. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012.
9. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 с.
10. Ломакин В.О., Петров А.И. Верификация результатов расчета в пакете гидродинамического моделирования STAR-CCM+ проточной части центробежного насоса АХ 50-32-200 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2012, Спец. выпуск. с. 6-9.
11. Ломакин **В.О.**, Петров А.И., Кулешова М.С. Исследование двухфазного течения в осецентрированном колесе методами гидродинамического моделирования // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 9. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/725724.html> (дата обращения 23.09.2014).
12. Brennen C.E. Fundamentals of Multiphase Flows. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 410 с.
13. David C. Wilcox. Turbulence Modeling for CFD. 3rd ed. DCW Industries, 2006. 515 с.
14. Gulich J. F. Centrifugal Pumps. 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 964 с.
15. Daqing Zh., Yuan Zh., Ge X. CFD Simulation of the Whole Pump Station Inlet Flow Field // ASME 2008 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the Heat Transfer, Energy Sustainability, and 3rd Energy Nanotechnology Conferences. Volume 1: Symposia, part A and B, Jacksonville, 2008, pp. 973-977. DOI:[10.1115/FEDSM2008-55235](https://doi.org/10.1115/FEDSM2008-55235)
16. Ding H., Visser F.C., Jiang Y., Furmanczyk M. Demonstration and Validation of a 3D CFD Simulation Tool Predicting Pump Performance and Cavitation for Industrial Applications // Journal of Fluids Engineering, 2011. 133(1). DOI:[10.1115/1.4003196](https://doi.org/10.1115/1.4003196).

The Importance of Computational Modeling of Large Pumping Stations

S.M. Bozh'eva^{1,*}, V.O. Lomakin²

* svetlana@pump.ru

¹Company "Water Supply and Sanitation", Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: pumping station, submersible pump, inlet chamber, CFD, flow alignment, minimum water level, stagnant zones, vortex formation

The article presents main design and structure principles of pumping stations. It specifies basic requirements for the favorable hydraulic operation conditions of the pumping units. The article also describes the designing cases, when computational modeling is necessary to analyse activity of pumping station and provide its reliable operation. A specific example of the large pumping station with submersible pumps describes the process of computational modeling of its operation. As the object of simulation was selected the underground pumping station with a diameter of 26 m and a depth of 13 m, divided into two independent branches, equipped with 8 submersible pumps. The objective of this work was to evaluate the effectiveness of the design solution by CFD methods, to analyze the design of the inlet chamber, to identify possible difficulties with the operation of the facility. In details are described the structure of the considered pumping station and applied computational models of physical processes. The article gives the detailed formulation of the task of simulation and the methods of its solving and presents the initial and boundary conditions. It describes the basic operation modes of the pumping station. The obtained results were presented as the flow patterns for each operation mode with detailed explanations. Data obtained as a result of CFD, prove the correctness of the general design solutions of the project. The submersible pump operation at the minimum water level was verified, was confirmed a lack of vortex formation as well as were proposed measures to improve the operating conditions of the facility. In the inlet chamber there are shown the stagnant zones, requiring separate schedule of cleaning. The measure against floating debris and foam was proposed. It justifies the use of computational modeling (CFD) for the verifying and adjusting of the projects of large pumping stations as a much more precise tool that takes into account all the features of the object compared to the empirical formulas.

References

1. Berezin S.E. *Nasosnye stantsii s pogruzhnymi nasosami. Raschety i konstruirovaniye*. [Pumping stations with submersible pumps. Calculations and design]. Moscow, Stroiizdat Publ., 2008. 160 p. (in Russian).
2. Samokhin V.N., ed. *Kanalizatsiya naselennykh mest i promyshlennykh predpriyatiy* [Sewerage of settlements and industrial enterprises]. Moscow, Stroiizdat, 1981. 639 p. (in Russian).
3. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. and others. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody. Uchebnik dlya mashinostroitel'nykh vuzov*. [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives. Textbook for engineering universities] 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 423 p. (in Russian).
4. Bazhenov V.I. *Matematicheskoe modelirovaniye gidrodinamicheskikh i vodoochistnykh processov* [Mathematical modeling of hydrodynamic and water treatment processes]. *Jakovlevskie chteniya. 9-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: sbornik dokladov*. [Jakovlev's read. 9th scientific and technical conference: abstracts]. Moscow, 2014. (in Russian).
5. Bazhenov V.I., Petrov V.I., Bukharov K.D., Ivanov A.V., Filippov G.G. Development and numerical simulation of fish protection facilities on the basis of the flow-forming device. *Gidrotekhnika = Hydraulic*, 2014, no. 1, pp. 21-28. (in Russian).
6. Bazhenov V.I., Epov A.N., Gusarov O.S. The application of the method of computer simulation of the hydrodynamics of flows (CFD) to optimize the design of the aeration tank. *Vodosnabzhenie i kanalizatsiya = Water and sanitation*, 2009. no. 3. pp. 47-55. (in Russian).
7. American National Standard for Pump Intake Design. ANSI/HI, 2012.
8. SP 32.13330.2012. *Kanalizatsiya. Naruzhnyye seti i sooruzheniya* [Set of rules 32.13330.2012. Sewerage. Pipelines and wastewater treatment plants]. Moscow, Ministerstvo regionalnogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii, 2012.
9. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.
10. Lomakin V.O., Petrov A.I. Verification of computation results of the AX 50-32-200 centrifugal pump wet part in the software package STAR CCM+. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceeding of Higher Educational Institutions. Machine Building. Special edition*, 2012. p. 6-9. (in Russian).
11. Lomakin V.O., Petrov A.I., Kuleshova M.S. Investigation of two-phase flow in axial-centrifugal impeller with hydrodynamic modeling methods. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014. no. 9. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/725724.html>, accessed 23.09.2014. (in Russian).
12. Brennen C.E. Fundamentals of Multiphase Flows. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 410 p.
13. David C. Wilcox. Turbulence Modeling for CFD. 3-е изд. DCW Industries, 2006. 515 p.

14. Gulich J. F. Centrifugal Pumps. 2-е изд. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 964 p.
15. Daqing Zh., Yuan Zh., Ge X. CFD Simulation of the Whole Pump Station Inlet Flow Field. *ASME 2008 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the Heat Transfer, Energy Sustainability, and 3rd Energy Nanotechnology Conferences*. Volume 1: Symposia, part A and B, Jacksonville, 2008, pp. 973-977. DOI:[10.1115/FEDSM2008-55235](https://doi.org/10.1115/FEDSM2008-55235)
16. Ding H., Visser F.C., Jiang Y., Furmanczyk M. Demonstration and Validation of a 3D CFD Simulation Tool Predicting Pump Performance and Cavitation for Industrial Applications. *Journal of Fluids Engineering*, 2011. no. 133(1). DOI:[10.1115/1.4003196](https://doi.org/10.1115/1.4003196)