

Исследование влияния технологии изготовления коллекторов на гидравлические потери в насосных установках

Д. С. Коньшин, магистр кафедры Э10 МГТУ им. Н. Э. Баумана, руководитель отдела маркетинга ООО «СИЭНПИ РУС»

Ключевые слова: установки повышения давления, гидродинамическое моделирование, технология изготовления коллекторов

Статья посвящена комплексному исследованию влияния технологии изготовления коллекторов на ключевые эксплуатационные характеристики насосных установок повышения давления, используемых в системах водоснабжения. Рассмотрено влияние технологии на гидравлические потери и гигиеническую безопасность. Представлены результаты сравнительного анализа двух методов изготовления коллекторов, включая значения гидравлических потерь. На основе результатов анализа сделаны выводы о предпочтительности технологии с применением вытяжки, обеспечивающей оптимальное сочетание гидравлической эффективности и гигиенической безопасности.

Система водоснабжения представляет собой совокупность взаимосвязанных инженерных сооружений, предназначенных для обеспечения потребителей водой установленного качества и в необходимых объемах. Ключевым элементом таких систем являются многонасосные установки повышения давления, задача которых – подача воды с требуемыми расходом и напором до конечного потребителя. При этом энергопотребление насосного оборудования составляет значительную долю в структуре эксплуатационных расходов жилищно-коммунального хозяйства [1].

При изготовлении насосных установок повышения давления одним из наиболее ответственных элементов, требующих особого внимания производителя, являются коллекторы, основная функция которых заключается в обеспечении равномерного распределения потока рабочей среды между насосными агрегатами.

Традиционно коллекторы изготавливаются сварным методом из отдельных трубных заготовок и фасонных элементов. Классическая технология предполагает последовательное



■ Рис. 1. Элемент напорного коллектора, изготовленный классическим методом

соединение трубных элементов с помощью дуговой сварки (рис. 1). Основным этапом данного процесса является формирование отверстий и вырезов в стенках магистральной трубы и присоединяемых элементах. Как правило, такие соединения выполняются под углом 90°, что требует высокой точности при разметке и вырезании сопрягаемых элементов.

В производственной практике для получения так называемого «седлового» выреза, обеспечивающего плотное сопряжение трубы меньшего диаметра с поверхностью основной трубы, используют шаблоны, чертежные методы или специализированные приспособления. После подгонки патрубок фиксируется при помощи прихваточных швов (task-сварки), а затем по периметру выполняется полный обвар с применением многослойного прохода, особенно при работе с толстостенными трубами.

Несмотря на широкое распространение и технологическую доступность, данный метод сопряжен с рядом недостатков. В частности, наличие неровностей сварного шва, деформации, возникающие в процессе сварки, и отсутствие плавных переходов между элементами могут приводить к образованию дополнительных зон турбулентности и, как следствие, увеличению локальных гидравлических потерь.



■ Рис. 2. Этапы изготовления коллектора с применением вытяжки отверстий

Более современной альтернативой традиционным методам изготовления сварных коллекторов является технология предварительного формирования переходного посадочного участка путем вытяжки металла в зоне сопряжения. Данный технологический процесс начинается с выполнения предварительного круглого или овального отверстия в стенке основной трубы (магистральной) в месте предполагаемого присоединения патрубка. Далее с использованием специального инструмента – вытяжного дорна или гидравлического пуансона – осуществляется локальная пластическая деформация металла, в результате которой край отверстия вытягивается наружу, формируя цилиндрическую или слегка коническую втулку, направленную вдоль оси присоединяемого патрубка (рис. 2).

На следующем этапе сформированный выступ (втулка) подвергается механической обработке – расточке или развертыванию, – что позволяет добиться точного диаметра, соосности и гладкой посадочной поверхности. Только после выполнения описанных операций производится приварка патрубка к сформированной втулке с минимальным зазором (рис. 3). Данная технология, обеспечивая высокую точность геометрии соединения, требует высокой квалификации персонала и применения специализированного оборудования. Такой подход при производстве установок повышения давления



Рис. 3. Соединение труб при использовании вытяжки отверстий и автоматической кольцевой сварки (вид изнутри)

использует, например, ООО «СИЭНПИ РУС» на своей производственной площадке в подмосковном Есипово.

Применение описанного подхода обеспечивает ряд преимуществ:

- снижение гидравлических потерь и уровня шума за счет формирования плавного перехода между основным каналом и патрубком;
- исключение зон застоя, что особенно актуально при перекачивании питьевой воды;
- снижение вероятности возникновения дефектов сварного шва в процессе производства.

В рамках данной статьи будет проведен сравнительный анализ методов изготовления коллекторов для насосных установок повышения давления: классического и с применением вытяжки. Для оценки эффективности рассматриваемых методов будет использовано гидродинамическое моделирование с применением вычислительных методов, позволяющих анализировать поведение потока жидкости в различных геометриях коллекторов.

Методы

Для определения гидравлических потерь в напорном коллекторе насосной установки были использованы возможности современных пакетов гидродинамического моделирования. Метод численного моделирования основан на решении дискретных аналогов базовых уравнений гидродинамики [2, 3].

В случае модели несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) эти уравнения можно записать в следующем виде.

Уравнение неразрывности жидкой среды:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0,$$

где \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} – проекции осредненного значения скорости жидкости на соответствующие оси x , y , z .

Уравнение изменения количества движения, осредненное по времени:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2\mu S_{ji} - \overline{\rho \cdot u_j \cdot u_i} \right)$$

где \bar{U}_i – осредненный тензор скоростей;

P – осредненное статическое давление;

\bar{S}_{ji} – тензор скоростей деформации;

$-\overline{\rho u_j u_i}$ – тензор Рейнольдсовых напряжений.

Введение уравнения Навье–Стокса, осредненного по Рейнольдсу, делает систему уравнений незамкнутой, т. к. в нее вводятся неизвестные Рейнольдсовы напряжения. Для того чтобы замкнуть эту систему, в данной задаче была использована полуэмпирическая k – ω –SST – модель турбулентности, которая вводит необходимые дополнительные уравнения:

- уравнение переноса кинетической энергии турбулентности

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \sigma^* \mu_T \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right),$$

где k – кинетическая энергия турбулентности;

β^* , σ^* – коэффициенты;

ω – удельная скорость диссипации;

$\mu_T = \rho \cdot k / \omega$ – вихревая вязкость.

- уравнение относительной скорости диссипации

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \sigma^* \mu_T \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + 2\rho(1-F_1)\sigma_2 \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j},$$

где α , σ , σ_2 – коэффициенты замыкания.

Для проведения моделирования были подготовлены трехмерные модели коллекторов для насосных установок повышения давления Aikon PBS [4] с тремя насосами серии CDM 20-го типоразмера, изготовленных различными методами (рис. 4). С их помощью была получена модель жидкости, использовавшаяся для дальнейших расчетов.

Каждая модель была смоделирована на сетке, состоящей из приблизительно 350 тыс. ячеек. В ядре потока ячейки имеют многогранную форму, а у твердых стенок трубы – призматическую. Расчетная сетка представлена на рис. 5. Для исключения

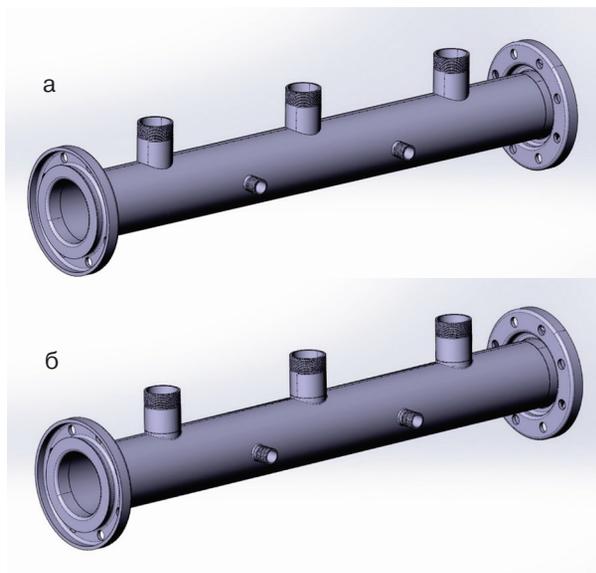


Рис. 4. 3D-модели коллекторов:
 а – коллектор, изготовленный по «классической» технологии;
 б – коллектор, изготовленный по технологии с вытяжкой

влияния завихрений на выходе был использован экструдер длиной 2 м.

В качестве граничных условий были заданы номинальные подачи каждого из насосов $20 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Анализ результатов

Поле распределения скоростей в обоих случаях показано на рис. 6–7. Полученные в результате расчета значения гидравлических потерь давления в зависимости от метода изготовления приведены в табл. 1.

Картины течения в обоих случаях схожи. При этом разница в гидравлических потерях при разных технологиях изготовления составила 6 %. Такой скромный результат объясняется в первую очередь использованием идеализированной геометрии,

Таблица 1

Параметр	«Классический» метод	Метод с вытяжкой
Перепад давлений, Па	257	242

в которой были исключены возможные дефекты сварных соединений, локальные неровности и шероховатость швов, а также неточность подгонки элементов, что часто встречается при использовании «классического» метода изготовления.

Таким образом, несмотря на различие в технологиях изготовления, полученный эффект в виде снижения гидравлических потерь оказался не столь выраженным в рамках идеализированной CFD-модели. Ожидается, что при переходе к реальным условиям эксплуатации, где проявляются технологические отклонения, сварочные наплывы и шероховатость, разница может быть более существенной.

Помимо гидродинамических характеристик важным критерием при выборе технологии изготовления коллекторов для насосных установок, особенно применяемых в системах водоснабжения зданий и сооружений, является их гигиеническая безопасность [5]. Конструктивные особенности и качество сварных соединений напрямую влияют на возможность накопления загрязнений, биологических отложений и образование зон застоя воды.

Традиционный способ изготовления коллекторов с использованием прямого врезания труб в магистраль с последующей ручной сваркой нередко сопровождается образованием резких переходов, сварочных выступов и «мертвых зон» внутри трубопровода. Подобные дефекты затрудняют проведение санитарной обработки системы и создают благоприятные условия для развития микрофлоры, что недопустимо в системах питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения.

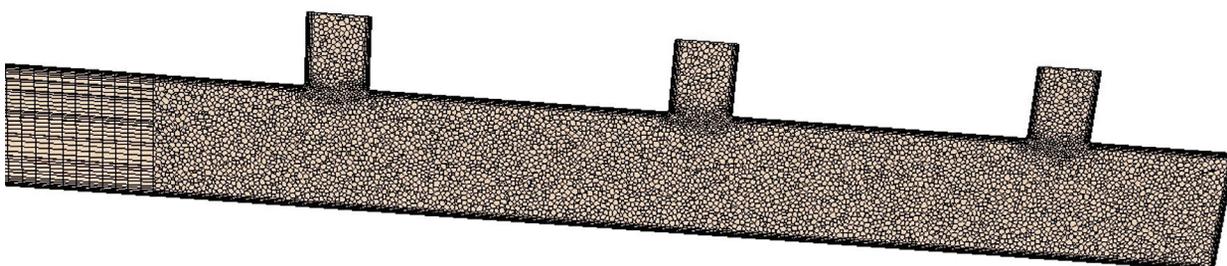
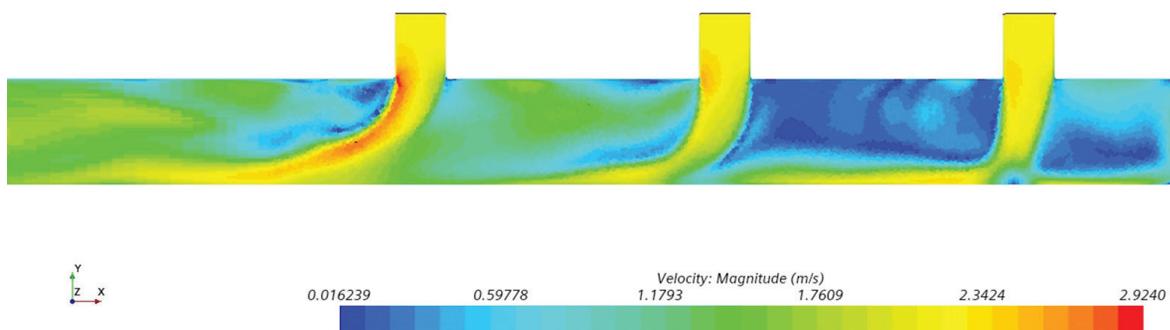
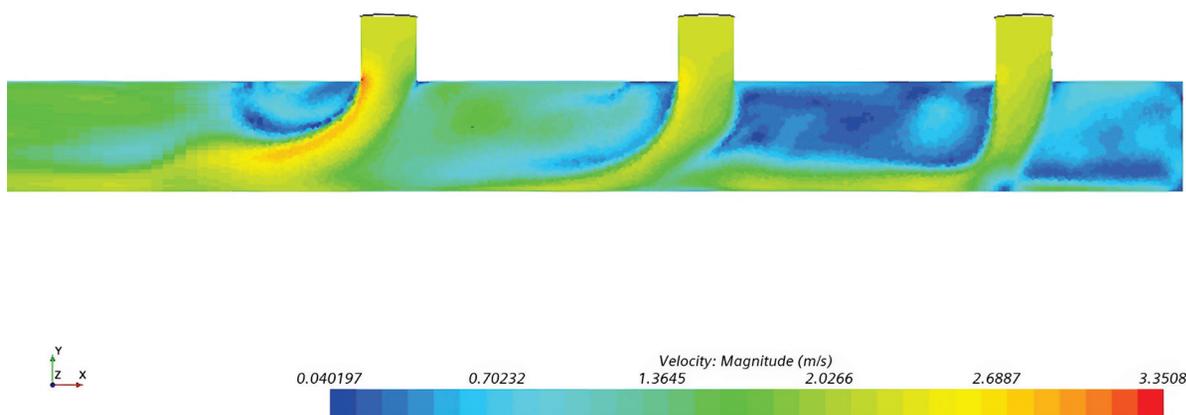


Рис. 5. Расчетная сетка



■ Рис. 6. Распределение поля скоростей при «классической» технологии



■ Рис. 7. Распределение поля скоростей при технологии с вытяжкой

Альтернативная технология, основанная на формировании гигиеничных патрубков с вытяжкой и последующей механической обработке переходного участка под привариваемую трубу, обеспечивает более плавный профиль потока и минимизирует образование зон турбулентности и застоя, что положительно сказывается на поддержании качества воды.

Основываясь на результатах проведенного анализа, представленных в статье, можно сделать вывод, что технология производства коллекторов для насосных установок с использованием операции вытяжки отверстия является предпочтительным методом изготовления, обеспечивающим ряд преимуществ перед классическими методами. В частности, она позволяет добиться улучшения гидродинамических характеристик, повышения гигиенической безопасности системы водоснабжения и снижения эксплуатационных затрат, что в совокупности способствует повышению эффективности и надежности работы насосной установки в целом.

Литература

1. Николенко И. В. Анализ энергоэффективности частотного регулирования по относительным параметрам силовых агрегатов насосных станций и водопроводных сетей систем водоснабжения // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 14(66). – С. 101–111.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. 7-е изд. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
3. Ломакин В. О., Петров А. И. Верификация результатов расчета в пакете гидродинамического моделирования STAR-CCM+ проточной части центробежного насоса AX 50-32-200 // Известия высших учебных заведений. Социология. Экономика. Политика. – 2012. – С. 6.
4. PBS – Установки повышения давления // Aikon. – URL: <https://aikoncontrol.ru/catalog/ustanovki-povysheniya-davleniya/PBS.html> (дата обращения: 11.04.2025).
5. Hygienic manifolds for boosting systems // Grundfos. – URL: <https://www.grundfos.com/ae/learn/research-and-insights/hygenic-manifolds> (дата обращения: 11.04.2025).