

На правах рукописи

ЛЕДОВСКИЙ Григорий Николаевич

**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ЗАЩИТЫ ОСНОВНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ
ОТ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ**

*Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент

Кабанов Олег Васильевич

Официальные оппоненты:

Абиев Руфат Шовкетович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра «Оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры», заведующий кафедрой

Афиногентов Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра «Трубопроводный транспорт», доцент

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

Защита состоится 06 июня 2019 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.13 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 05 апреля 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ТАНАНЫХИН
Дмитрий Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Согласно проекту «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года», который представлен Министерством энергетики Российской Федерации (редакция от 01 февраля 2017 г.), наряду с другими важными задачами нефтяной отрасли, главными задачами являются развитие нефтепроводов и нефтепродуктопроводов на основе передовых технологий, а также рост объемов и диверсификация внешних и внутренних поставок жидких углеводородов, в том числе увеличение более чем в два раза поставок нефти и нефтепродуктов на рынки Азиатско-Тихоокеанского региона. Кроме того, одним из основных структурных изменений, приводящих к требуемому целевому состоянию, является снижение загрязнения окружающей среды.

Решение этих задач связано с увеличением производительности и протяженности нефтепроводов, оптимизацией управления нефтеперекачивающими системами и повышением уровня автоматизации всех взаимодействующих структурных элементов систем. Так как амплитуды волн давления и расхода напрямую зависят от производительности и протяженности нефтепроводов, то указанные обстоятельства повышают вероятность аварии в случае возникновения и распространения волн давления, поэтому необходимы мероприятия, направленные на повышение надежности нефтеперекачивающих систем и предотвращение аварий. Надежность нефтеперекачивающих систем определяется, прежде всего, предупреждением аварийных ситуаций при эксплуатации основного оборудования на нефтеперекачивающих станциях, ввиду его сложности и дороговизны ремонта. При возникновении волн давления вблизи нефтеперекачивающей станции возникает вероятность повреждения и разрушения основных узлов станции, таких как: блок регуляторов давления, блок фильтров грязеуловителей, выходной коллектор магистральной насосной, отсекающие и агрегатные задвижки, обратные клапаны, нефтеперекачивающие агрегаты. Волны давления и гидравлические удары в нефтепроводах способны вызывать разгерметизацию основных линий и узлов магистральной трубопроводной системы.

Очевидно, что защита основных узлов магистральных нефтепроводов от воздействий волн давления будет способствовать соблюдению требований экологической и промышленной безопасности в соответствии с проектом «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года».

Таким образом, тема диссертации является актуальной, она интересна с научной точки зрения, в связи со сложностью расчета волнового процесса и необходимостью прогнозирования фаз развития гидроударных явлений в системе «нефтеперекачивающая станция – магистральный нефтепровод», а также имеет большую практическую значимость при проектировании новых и безопасной эксплуатации имеющихся нефтеперекачивающих систем.

Степень разработанности исследуемого направления

Теорией неуставившихся процессов в трубопроводах, перекачивающих жидкости, занимались многие крупные ученые прошлого и современности, такие как: Н.Е. Жуковский, И.А. Чарный, А.Г. Гумеров, К.Г. Асатур, М.В. Лурье, Д.А. Фокс, В.Л. Стритер, Е.Б. Уайли, М.Х. Чадри и многие другие.

Кроме того, в недавнем прошлом был защищен ряд диссертаций похожей тематики следующих авторов: О.Г. Капинос, Н.В. Твардовская, А.В. Адоевский, А.Ю. Верушин, Н.С. Арбузов, С.Ю. Переверзев, А.О. Савихин, У.Э. Аллаяров, И.Н. Налобин, В.Г. Гасенко и некоторых других авторов.

Несмотря на обширный список работ по данной тематике, некоторые аспекты остались малоизученными и не описанными в полной мере. К ним, например, принадлежат вопросы об учете влияния растворенного в нефти газа на параметры процесса, о возможности расчета потерь на трение применительно к неуставившемуся режиму течения, о реализации решения сложного граничного условия, состоящего из характеристик станции в четырех квадрантах и характеристик обратной трубопроводной арматуры, о своевременном срабатывании и рациональном выборе параметров устройств защиты, а также вопрос о применении альтернативных методов решения математической модели процессов распространения и сглаживания волн давления.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является совершенствование системы защиты основного оборудования нефтеперекачивающих станций от волн повышенного и пониженного давления.

Задачи исследования:

– выполнить анализ имеющихся теоретических работ и практических разработок по тематике диссертационного исследования;

– составить математическое описание и провести компьютерное моделирование волнового процесса в системе «нефтеперекачивающая станция – магистральный нефтепровод»;

– оценить влияние наличия растворенного газа в нефти на параметры процесса распространения волн давления в нефтепроводах;

– предложить модель расчета потерь давления на гидравлическое трение при неустановившемся режиме течения и выполнить сравнительную оценку с аналогичными потерями при установившемся режиме течения;

– провести серию экспериментов на стенде по изучению явления гидравлического удара и выполнить сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами компьютерного моделирования;

– выполнить анализ параметров волн давления в системе «нефтеперекачивающая станция – магистральный нефтепровод» и разработать на его основе наиболее рациональный способ защиты оборудования нефтеперекачивающих станций;

– создать физическую модель нефтеперекачивающей системы с интегрированной в нее защитой от волн давления и подтвердить техническую эффективность разработанного способа путем проведения серии экспериментов;

– разработать методику выбора технологических и конструктивных параметров устройства защиты от волн давления и сделать практические рекомендации по эффективности его использования.

Научная новизна исследования

1. Предложен новый способ гашения волн ударного давления в нефтепроводах, заключающийся в упреждающем воздействии на предохранительный перепускной клапан с электромеханическим приводом и сглаживании фронта волны до безопасных значений.

2. Определены зависимости между параметрами упреждающего воздействия и характеристиками волн давления, которые позволяют обосновать параметры сброса перекачиваемой нефти, что понижает риск чрезмерного повышения давления в узлах основного оборудования нефтеперекачивающих станций.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Составлена методика расчета процесса распространения волн давления с учетом изменения скорости волны давления в результате газовыделения в нефти, потерь напора на трение при неустановившемся режиме течения потока, с учетом эффекта линейного переуплотнения по длине магистральной линии и явления запирания давления в магистральных нефтепроводах между запорно-регулирующей арматурой и нефтеперекачивающей станцией, насосы которой оборудованы обратными клапанами.

2. Создан алгоритм работы системы управления предохранительным клапаном сброса с электромеханическим приводом на основе выбранных параметров системы сглаживания волн давления.

3. Разработано новое устройство защиты магистральных нефтепроводов и оборудования нефтеперекачивающих станций от волн давления, способное сглаживать разные по знаку скачки давления как со стороны линии питания, так и со стороны линии нагнетания станции, которое может быть реализовано в качестве основного узла систем сглаживания волн давления.

4. Разработаны практические рекомендации по выбору параметров устройства защиты от волн давления, обеспечивающих надежную защиту основных узлов нефтеперекачивающих станций.

Методология и методы исследования

1. Теоретические исследования включают математическое описание и компьютерное моделирование волнового процесса в системе «нефтеперекачивающая станция – магистральный

нефтепровод», анализ параметров волн давления во времени и пространстве, а также выбор наиболее рационального способа предупреждения данного явления.

2. Экспериментальные исследования включают проведение экспериментов на стенде по изучению явления гидравлического удара, создание физической модели системы «насос-трубопровод», оборудованной устройством защиты на основе предложенного способа и обработку полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Продолжительность сброса и степень открытия клапана защиты от волн давления зависят от амплитуды и фазы волны ударного давления, которые определяются характеристиками насосных агрегатов, обратных клапанов и соотношением скорости изменения режима к протяженности исследуемого участка нефтепроводной системы.

2. Для защиты нефтеперекачивающей системы от волн повышенного и пониженного давления следует создавать дополнительное воздействие по нагрузке путем опережающего открытия клапана сброса, при этом выбор параметров работы устройства защиты должен учитывать его быстродействие и параметры потока среды при неустановившемся режиме течения, которые зависят от степени затухания волны давления и фактора газовыделения при снижении давления до определенных значений.

Степень достоверности результатов исследования

Теоретические исследования на основе предложенной математической модели, выраженные в компьютерном моделировании волновых процессов в насосно-трубопроводной системе и моделировании работы разработанного устройства защиты, подтверждаются экспериментальными исследованиями на стенде по изучению гидравлического удара и экспериментальной установке, включающей физическую модель данного устройства защиты.

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 66-ой Международной молодежной научно-практической конференции «Нефть и газ –

2012» (17-20 апреля 2012, г. Москва), Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» (27-30 августа 2012, г. Туапсе), Российской технической нефтегазовой конференции и выставке SPE по разведке и добыче (16-18 октября 2012, г. Москва), Всероссийской конференции-конкурсе студентов выпускного курса (03-05 апреля 2013, г. Санкт-Петербург), Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (24-26 апреля 2013, г. Санкт-Петербург), Всероссийской конференции «Изобретатели в инновационном процессе России» (20-21 декабря 2013, г. Санкт-Петербург), Международной конференции по вопросам минерально-сырьевых ресурсов «Innovations in Mineral Resource Value Chains» (12-13 июня 2014, г. Фрайберг, Германия).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, 2 из которых в изданиях, включенных в перечень научных изданий ВАК. Получен 1 патент на изобретение.

Личный вклад соискателя

Обосновано применение способа защиты узлов нефтеперекачивающей станции при помощи клапана сброса с электромеханическим приводом; составлено математическое описание процесса распространения волн давления и сброса ударных волн; разработана физическая модель насосно-трубопроводной системы, которая оборудована устройством защиты от ударных волн; выполнены экспериментальные исследования; разработана методика выбора клапана сброса.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 124 страницах текста, состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 100 источников и 1 приложения, содержит 58 иллюстраций и 7 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю к.т.н., доценту кафедры «Транспорта и хранения нефти и газа» Олегу Васильевичу Кабанову и всем членам кафедры за помощь, оказанную при подготовке диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, изложена степень ее разработанности, продемонстрирована научная новизна работы, приведены теоретическая и практическая значимости, методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены степень достоверности и апробация результатов исследования.

В первой главе рассмотрены причины возникновения волн давления и последствия для основного оборудования нефтеперекачивающих станций. В качестве ярко выраженного примера причин возникновения ударной волны описан процесс закрытия задвижки на линейной части магистрального нефтепровода за время, которое меньше фазы гидравлического удара. Также рассмотрен случай срабатывания обратных клапанов магистральных насосов нефтеперекачивающей станции и явление «запирания» давления в напорной линии станции.

Наряду с хорошо изученными направлениями исследований неустановившихся процессов в трубопроводах, анализ теоретических работ и экспериментальных исследований выявил те направления, изучение которых поможет усовершенствовать существующие способы предупреждения чрезмерных перегрузок по давлению, в частности, режимы работы насосных агрегатов и обратных клапанов при прохождении волны давления, изменение скорости волны давления из-за наличия растворенного газа, гидравлическое трение при неустановившемся режиме течения.

Обзор современных способов защиты от волн давления выявил как достоинства, так и недостатки этих способов. Для комплексной защиты оборудования нефтеперекачивающих станций необходима защита от волн и повышенного, и пониженного давления, как со стороны линии питания станции, так и со стороны линии нагнетания станции. В условиях наличия высокой производительности магистральных нефтепроводов целесообразным способом является сброс части транспортируемой жидкости при прохождении волн повышенного давления, и подкачка жидкости при прохождении волн пониженного давления. Ввиду высокой

скорости протекания волновых процессов приоритетной задачей является обеспечение своевременного срабатывания клапана сброса.

Во второй главе дано теоретическое обоснование процессов возникновения, распространения и ликвидации волн давления в системе «нефтеперекачивающая станция – магистральный нефтепровод», при этом приводится математическое описание неустановившегося процесса для каждого компонента системы: нефтепровода, нефтеперекачивающей станции, запорно-регулирующей арматуры и устройства защиты от волн давления.

Для волнового процесса в нефтепроводе приведены два уравнения в частных производных, которые в виде системы уравнений составляют основу всей математической модели волнового процесса в нефтеперекачивающей системе

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho \cdot a^2 \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{4 \cdot \tau_0}{\rho \cdot d} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где a – скорость волны ударного давления; ρ – плотность нефти; d – внутренний диаметр нефтепровода; τ_0 – касательное напряжение на стенке трубы; p – давление; u – скорость потока нефти; x – расстояние; t – время.

Система уравнений (1) связывает давление в нефтепроводе и скорость потока нефти при неустановившемся режиме течения. Достаточно точное решение данной системы уравнений выполняется методом характеристик, который хорошо изучен, позволяет без особых затруднений решать нелинейные задачи и применяется в мировой практике сравнительно долгое время.

На скорость волны давления в нефтепроводе, кроме плотности и модуля объемной упругости нефти оказывают влияние параметры нефтепровода: диаметр, толщина стенки, материал трубы. В общем случае на величину скорости волны давления, кроме перечисленных параметров, влияет расчетная температура и газонасыщенность нефти.

В результате газовыделения скорость волны может быть переменной. Для корректного расчета параметров волн давления

приведена модель, позволяющая вычислять количество газа, способного высвободиться из нефти при уменьшении давления, при этом предполагается, что свободный газ распределяется во всем объеме нефти и способен повторно растворяться при повышении давления, но этот процесс растворения происходит гораздо труднее, чем высвобождение. Так как выделение газа происходит при прохождении отрицательной волны давления, то на форму, амплитуду и продолжительность первого пика, если это положительный скачок давления, газовыделение не влияет.

Скорость волны давления является функцией внутреннего давления в нефтепроводе и массового содержания свободного и растворенного газа в нефти

$$a = \frac{a_0 \cdot p}{\sqrt{\rho^2 \cdot a_0^2 \cdot R \cdot T \cdot M + p^2}}, \quad (2)$$

где a_0 – скорость волны давления в нефтепроводе без учета газосодержания в нефти; R – газовая постоянная; T – температура; M – массовая доля свободного газа.

Для повышения точности расчета быстроизменяющегося неустановившегося процесса применяется следующая модель определения коэффициента гидравлического трения

$$\lambda_H = \lambda + \frac{\sqrt{V} \cdot d}{2 \cdot u^2} \left[\frac{\partial u}{\partial t} + a \cdot \operatorname{sgn}(u) \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| \right], \quad (3)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения при установившемся режиме течения; sgn – математическая функция «сигнум»; V – аппроксимационный коэффициент затухания Варди, который зависит от режима течения потока. Так, для ламинарного режима течения – $V = 0,00476$, а для турбулентного

$$V = 7,41 \cdot \operatorname{Re}^{-\log(14,3/\operatorname{Re}^{0,05})}, \quad (4)$$

где Re – число Рейнольдса.

К основному оборудованию нефтеперекачивающей станции, вносящему вклад в неустановившийся процесс распространения волн давления, не включая систему сглаживания волн давления, а

также сопутствующие коммуникации в линиях питания и нагнетания, можно отнести насосные агрегаты и обратные клапаны.

Граничное условие, моделирующее работу насосов нефтеперекачивающей станции в четырех квадрантах расходно-напорной характеристики, выглядит следующим образом

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial \omega} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

где H – дифференциальный напор насоса; Q – подача насоса; ω – угловая скорость вращения вала насоса.

Решение уравнения (5) производится при использовании относительных значений подачи, дифференциального напора, скорости вращения и крутящего момента на валу насоса. При этом используются безразмерные параметры Сьютера для напора, крутящего момента и определения квадранта нахождения рабочей точки насоса. Изменение угловой скорости во времени выражается отношением крутящего момента к суммарному моменту инерции насосного агрегата.

Для расчета обратных клапанов предлагается использовать две модели: модель обратного клапана с дисковым затвором и поворотный обратный клапан общего вида.

Работа обратного клапана с дисковым затвором является наиболее сложной и описывается через значения угла открытия диска затвора на каждом временном шаге, для определения которого необходимо вычисление углового ускорения диска затвора

$$\varepsilon = \frac{M_T - \operatorname{sgn}(u) \cdot M_\Gamma - M_B - \operatorname{sgn}(M_T - \operatorname{sgn}(u) \cdot M_\Gamma - M_B) \cdot M_C}{I_3}, \quad (6)$$

где M_T – момент силы тяжести затвора обратного клапана; M_Γ – гидродинамический момент; M_B – момент силы, выталкивающей дисковый затвор из нефти; M_C – момент сил сопротивления подвижного узла затвора; I_3 – момент инерции дискового затвора обратного клапана.

Моделирование поворотного обратного клапана в общем случае производится на основе уравнения соотношения давления и расхода. При этом за основу принято понятие равновесных потерь

давления, т.е. значение потерь давления в случае равновесия запирающего элемента при возможно минимальном расходе через клапан. Для моделирования работы поворотного обратного клапана общего вида при неустановившемся режиме течения потока используется уравнение

$$Q \cdot |Q| = \mu_Q^2 \cdot S_{3\phi}^2 \cdot 2 \cdot g \cdot H_{1-2} = \mu_Q^2 \cdot S^2 \cdot \delta^2 \cdot 2 \cdot \frac{P_{1-2}}{\rho}, \quad (7)$$

где Q – объемный расход через клапан; μ_Q – коэффициент расхода клапана; $S_{3\phi}$ – эффективная площадь поперечного проходного сечения клапана; S – площадь поперечного проходного сечения полностью открытого клапана; δ – степень открытия клапана; H_{1-2} – потери напора на клапане; p_{1-2} – потери давления на клапане.

Неустановившийся характер работы клапана задается разными значениями степени открытия клапана, определяемыми на каждом временном шаге через предыдущие значения следующим образом

$$\delta_n = \delta_{n-1} - \frac{2}{\tau^2} \cdot \left(\frac{P_{1-2}}{\rho \cdot g \cdot H_{1-2}^{CP}} - 1 \right) \cdot \Delta t^2, \quad (8)$$

где δ_{n-1} – степень открытия на предыдущем шаге; τ – характерное время работы клапана (необходимое для перехода от полностью открытого до полностью закрытого состояния); H_{1-2}^{CP} – потери напора, определяемые по кривой потерь напора от среднего расхода нефти в трубопроводе.

Закрытие и открытие трубопроводной арматуры являются основными причинами возникновения волн давления в системе магистральных нефтепроводов. Изменение положения запорного элемента трубопроводной арматуры вызывает изменение расхода нефти, что приводит к возникновению волн ударного давления по обе стороны от запорно-регулирующей арматуры.

Зависимость между потерей напора на запорно-регулирующей трубопроводной арматуре и скоростью потока в ее поперечном сечении выражается известной формулой

$$H_{1-2} = \xi \cdot \frac{u^2}{2g} \Rightarrow p_{1-2} = \frac{\xi \cdot Q^2 \cdot \rho}{2 \cdot S_{\text{ЭФ}}^2} . \quad (9)$$

В общем случае коэффициент сопротивления зависит от типа, размера и степени открытия трубопроводной арматуры. С поправкой на режим течения коэффициент сопротивления запорно-регулирующей арматуры определяется как

$$\xi = K_{\text{Re}} \cdot \xi_T , \quad (10)$$

где K_{Re} – коэффициент поправки на режим течения; ξ_T – значение коэффициента сопротивления трубопроводной арматуры в зоне развитого турбулентного течения.

Если отсутствуют данные значений коэффициента сопротивления для небольшой степени открытия арматуры, то он вычисляется следующим образом

$$\xi = \xi_{\delta \min} \cdot \left(\frac{\delta}{\delta_{\min}} \right)^{\frac{\delta_{\min}}{\xi_{\delta \min}} \cdot \frac{d\xi}{d\delta}} , \quad (11)$$

где δ_{\min} – минимальная степень открытия, для которой имеются данные коэффициента сопротивления; $\xi_{\delta \min}$ – коэффициент сопротивления, соответствующий минимальной степени открытия; δ – фактическая степень открытия.

Для моделирование неустановившихся процессов в нефтеперекачивающей системе необходимы начальные условия, в качестве которых принимаются расчетные параметры перекачки при установившемся режиме течения.

Компьютерное моделирование неустановившихся процессов в системе «нефтеперекачивающая станция – магистральный нефтепровод» производилось в лицензионном пакете программного обеспечения «Flowmaster V7» в рамках прохождения стажировки в компании ООО «Идеал ПЛМ СиАйЭс», которая является официальным партнером компании «Siemens PLM Software» по предоставлению данного программного обеспечения на территории России.

Процессы распространения волн давления на участке магистрального нефтепровода длиной 3 км в результате резкого закрытия задвижки на напорной линии при отсутствии и наличии обратных клапанов представлены на рисунках 1 и 2, соответственно. Изменение давления при порождении волн давления по исследуемому участку магистрального нефтепровода в зависимости от координат этого участка показано на рисунке 3. Характер изменения волн давления в зависимости от дистанции до граничного условия, определяемого задвижкой на напорной линии станции, приведен на рисунке 4. Зависимости амплитуды и фазы волн давления от содержания свободного и растворенного газов в нефти представлены на рисунке 5. Сравнение расчетов волнового процесса с учетом потерь давления на трение при неустановившемся режиме течения и без этого учета представлено на рисунке 6.

Имитация гидравлического удара на участке магистрального нефтепровода посредством компьютера позволяет предсказать фазы развития волны давления и найти пути предотвращения развития процесса, что, в конечном счете, помогает разработать наиболее рациональный способ защиты от данного опасного явления.

Предлагаемый способ защиты заключается в установке клапана сброса с регулируемым приводом на байпасной линии нефтеперекачивающей станции (рисунок 7). Клапан сброса работает по заданному сигналу от блока управления клапаном.

Блок управления сравнивает значение расхода в точке сброса давления со значением расхода в удаленной точке на линии нагнетания. Расстояние между точками обеспечивает своевременное открытие клапана сброса и определяется по формуле

$$l_{CB} = a \cdot (\tau + \tau_C), \quad (12)$$

где a – скорость волны ударного давления; τ – характерное время работы клапана, необходимое для перехода клапана от полностью закрытого состояния к полностью открытому состоянию; τ_C – время обработки и передачи сигнала от удаленной точки.

В штатном режиме, когда расход в точке «I» равен расходу в точке «II», клапан сброса закрыт. При возникновении волны

повышенного давления, например, вследствие закрытия задвижки «4» возникнет и волна пониженного расхода, которая вместе с волной давления распространяется в направлении станции. Когда волна достигает сечение «I», то она регистрируется и с заданной задержкой подается сигнал на открытие клапана защиты до величины «δ», которой будет достаточно для сброса необходимого количества нефти с учетом разности давлений на клапане.

Необходимый сбрасываемый расход на рассматриваемом временном шаге – это разность между расходом на нормальном режиме перекачки, т.е. в точке «II» и расходом при неустановившемся режиме, т.е. в точке «I».

Компьютерное моделирование работы устройства защиты от волн давления показывает хорошую техническую эффективность устройства за счет обеспечения допустимой скорости нарастания волны ударного давления 0,03 МПа/с. Соответствующий график представлен на рисунке 8. На рисунке 9, для сравнения, представлены графики сглаживания волны давления посредством предложенного способа и реально действующей ССВД «Daniel» на нефтеперекачивающей станции «Быково».

В третьей главе приведено описание стенда по изучению явления гидравлического удара, который позволяет качественно и количественно исследовать явление гидравлического удара.

Лабораторный стенд (рисунки 10, 11) включает в себя: три динамических насоса, один резервуар, систему гидравлических клапанов и труб, систему управления и визуализации. Система управления и визуализации включает в себя персональный компьютер, специализированное программное обеспечение, датчики расхода и давления жидкости, преобразователи сигналов.

В результате эксперимента получена зависимость давления от времени в сечении перед клапаном в результате его срабатывания (рисунок 12). На осциллограмме давления можно увидеть различия в скорости распространения ударной волны для разных фаз гидроударного процесса. Происходит это из-за наличия в воде начального свободного воздуха и его пополнения за счет выделения растворенного воздуха при прохождении волны пониженного давления. В работе проведено сравнение экспериментальных

данных с результатами расчета в соответствии с разработанной математической моделью (рисунок 12).

В рамках диссертационного исследования произведено физическое моделирование устройства защиты от волн давления, реализованное на специально сконструированной установке, технологическая схема и перечень основных комплектующих которой приведены на рисунке 13. Внешний вид установки в сборе после изготовления приведен на рисунке 14. В качестве исследуемой среды использовалось дизельное топливо летнее ДТ-Л-К5 «ЭКТО Disel» сорт С, вид II.

На рисунках 15 и 16 представлены зависимости давления от времени в сечениях перед отсечным клапаном и после насоса при включенном и отключенном устройстве защиты. На рисунках демонстрируется влияние обратного и перепускного клапанов на параметры гидроудара в трубопроводной системе. На графиках сплошной линией показано изменение давления при отключенном клапане сброса, а пунктирной линией – эпюра давления при включенном клапане сброса.

В четвертой главе предложена инженерная методика определения упрощенного расчетного критерия необходимости установки устройства защиты от волн давления, подкрепленная примером ее использования для большого числа насосно-трубопроводных систем.

В завершающей части работы сделаны рекомендации по выбору клапана сброса, входящего в устройство защиты, на основе его пропускной характеристики.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

– анализ имеющихся теоретических работ и практических разработок по тематике диссертационного исследования позволил выявить недостатки существующих систем защиты: отсутствие полноценной защиты от волн давления со стороны линии нагнетания, низкое быстродействие систем, наличие крупногабаритных сосудов, сложность конструкций, высокая стоимость и дороговизна обслуживания;

– теоретическое описание на основе математической модели нефтепровода, нефтеперекачивающих агрегатов, обратной и запорно-регулирующей арматуры позволяет выполнять компьютерное моделирование волновых процессов в системе «нефтеперекачивающая станция – магистральный нефтепровод»;

– обстоятельство, при котором растворенный в нефти газ выделяется и переходит в свободное состояние, приводит к существенному уменьшению скорости волны пониженного давления, что влияет на параметры сброса;

– несмотря на то, что выполненный расчет потерь на трение в неустановившемся режиме показывает близкие соответствующие значения для установившегося режима, он позволяет обеспечить более точную настройку устройства защиты от волн давления;

– в ходе проведенных экспериментов на стенде изучения гидравлического удара доказано уменьшение скорости волны давления при наличии свободного газа в жидкости;

– сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами расчета по приведенной математической модели процесса возникновения и распространения волн давления показало хорошую сходимость этих результатов;

– разработан способ защиты, заключающийся в сбросе части транспортируемой нефти или ее подкачке через байпасную линию станции, в зависимости от знака волны возмущения;

– для подтверждения технической эффективности способа защиты от волн давления создана физическая модель устройства защиты, интегрированного в систему «насос – трубопровод»;

– эффективность способа подтверждается графиками сглаженных волн давления, амплитуда которых в 2 – 12 раз меньше, чем у волн в отсутствии сброса.

По результату проделанной работы рекомендуется использование устройства защиты в виде клапана сброса на байпасной линии станции, выбор которого необходимо выполнять на основе пропускной характеристики клапана.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в усовершенствовании математического аппарата расчета волновых процессов, расширении количества и номенклатуры проводимых

экспериментов, более глубоком исследовании режимов и параметров работы сбросного клапана.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

1. Ледовский, Г. Н. Эффективность систем защиты оборудования нефтеперекачивающих станций при повышенных волнах давления / Г. Н. Ледовский, С. В. Самоленков, О. В. Кабанов // Записки Горного института. – 2014. – № 206. – С. 99–103.

2. Ледовский, Г. Н. Влияние обратного и перепускного клапанов на параметры гидроудара при перекачке жидких углеводородов / Г. Н. Ледовский, А. Е. Белоусов, О. В. Кабанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 3. – С. 281–289.

Патент на изобретение:

3. Пат. 2476728 Российская Федерация, МПК F04D15/00. Способ управления турбоагрегатами для перекачки жидкостей и газов / Кабанов О. В., Самоленков С. В., Ледовский Г. Н.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный университет». – № 2011126578/06; заявл. 28.06.2011; опубл. 27.02.2013. – 5 с. : ил.

Печатные публикации:

4. Кабанов, О. В. Об обеспечении экономичных режимов эксплуатации оборудования нефтеперекачивающих станций / О. В. Кабанов, С. В. Самоленков, Г. Н. Ледовский // V Санкт-Петербургский конгресс «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке»: сб. тр. – СПб. : Изд-во СПГГУ, 2011. – С. 100–105.

5. Кабанов, О. В. Устройство защиты оборудования нефтеперекачивающих станций от повышенных волн давления / О. В. Кабанов, Г. Н. Ледовский // IX Международная научно-практическая конференция «Ашировские чтения»: Труды. – Самара : Изд-во СамГТУ, 2012. – С. 184–185.

6. Ледовский, Г. Н. Моделирование волны ударного давления в нефтепроводе с учетом варьирования скорости ее распространения / Г. Н. Ледовский, О. В. Кабанов // V Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники»: сб. тр. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2012. – С. 146–147.

7. Ледовский, Г. Н. О защите оборудования нефтеперекачивающих станций от гидравлического удара / Г. Н. Ледовский // 66-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и Газ – 2012»: сб. тез. М. : Изд-во РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – С. 25.

8. Ледовский, Г. Н. Повышение надежности работы нефтеперекачивающих станций за счет совершенствования системы защиты от волн давления / Г. Н. Ледовский, О. В. Кабанов // Межрегиональный семинар «Рассохинские чтения»: материалы. – Ухта, 2013. – С. 142–146.

9. Самоленков, С. В. Энергосберегающее устройство управления транспортом нефти и нефтепродуктов / С. В. Самоленков, О. В. Кабанов, Г. Н. Ледовский // Межрегиональный семинар «Рассохинские чтения»: материалы. – Ухта, 2014. – С. 166–169.

10. Ledovskiy, G. N. Steigerung der Funktionssicherheit der Ölpumpenstationen durch Weiterentwicklung des Druckstoßschutzes / G. N. Ledovskiy, O. V. Kabanov // Scientific Reports on Resource Issues. – 2014. – P. 265–269.

11. Ляшенко, А. Л. Моделирование гидравлического удара в трубопроводах / А. Л. Ляшенко, С. Л. Морева, О. В. Кабанов, Г. Н. Ледовский // Третий национальный научный форум «Актуальные проблемы гидролитосферы»: сборник докладов. – Кисловодск : Изд-во РИА-КМВ, 2015. – С. 632–640.

12. Ледовский, Г. Н. Физическое моделирование устройства защиты насосов от волн давления / Г. Н. Ледовский, О. В. Кабанов // X Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2015»: материалы. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 437–439.

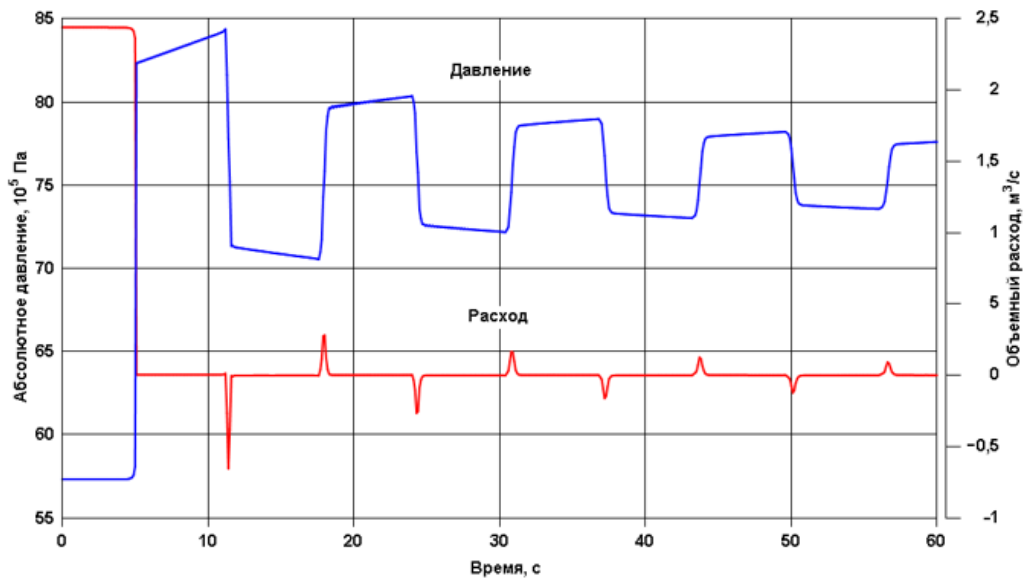


Рисунок 1 – Изменение давления и расхода перед задвижкой (без учета срабатывания обратных клапанов на станции)

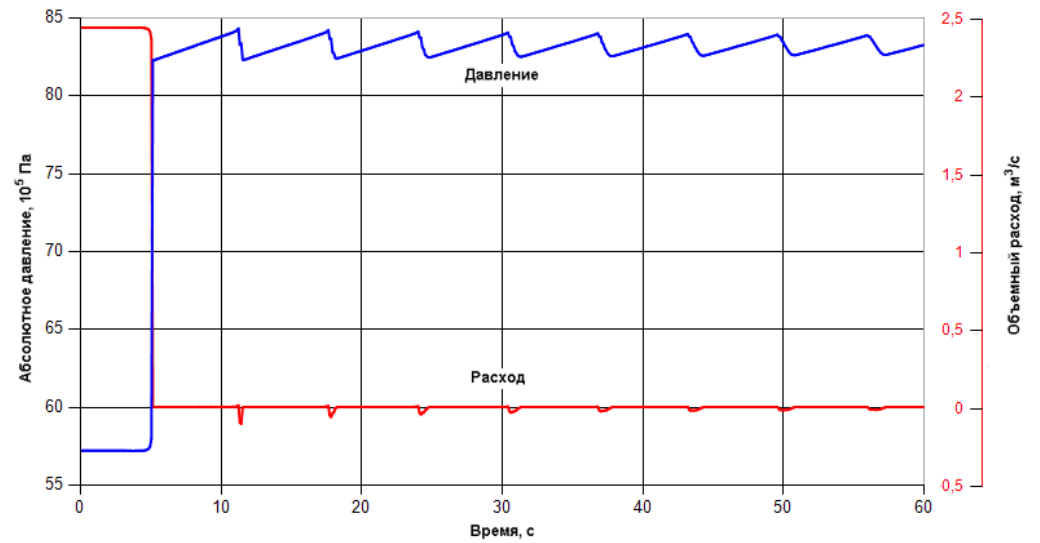


Рисунок 2 – Изменение давления и расхода перед задвижкой (при срабатывании обратных клапанов на станции)

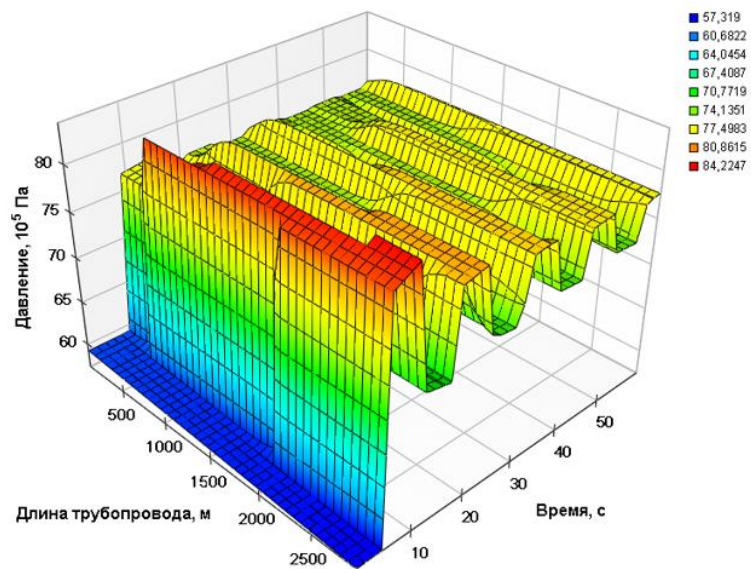


Рисунок 3 – График волн ударного давления на исследуемом участке магистрального нефтепровода

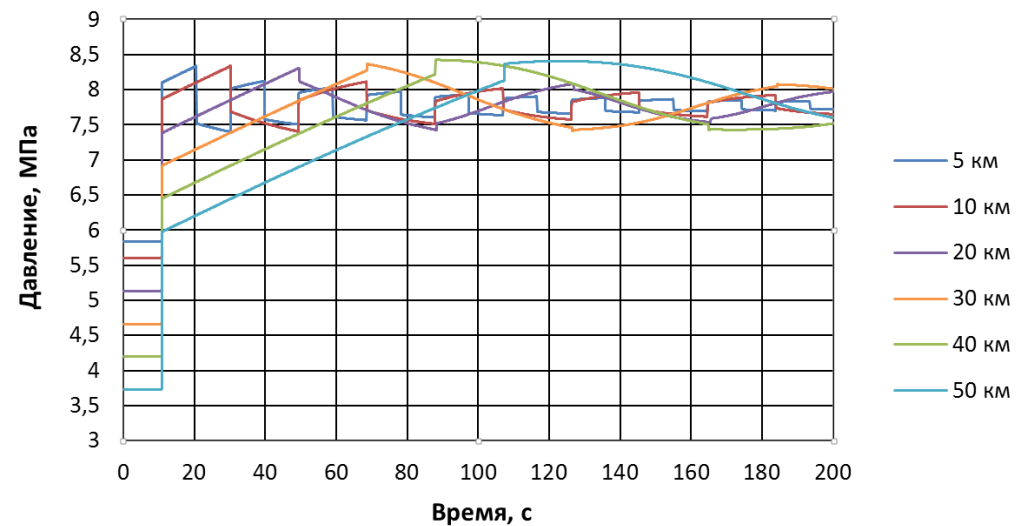


Рисунок 4 – Волны давления при закрытии задвижек на разных расстояниях от станции

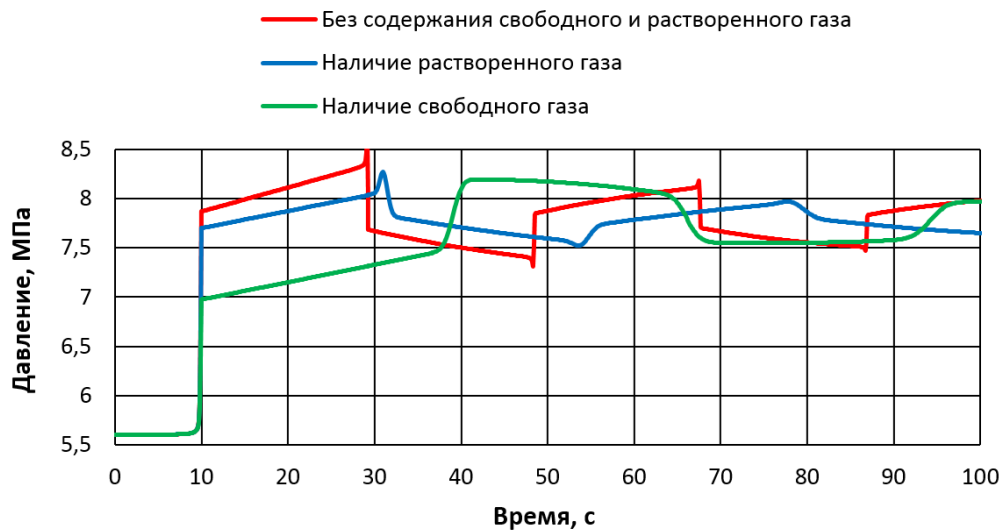


Рисунок 5 – Влияние газосодержания на параметры волн давления

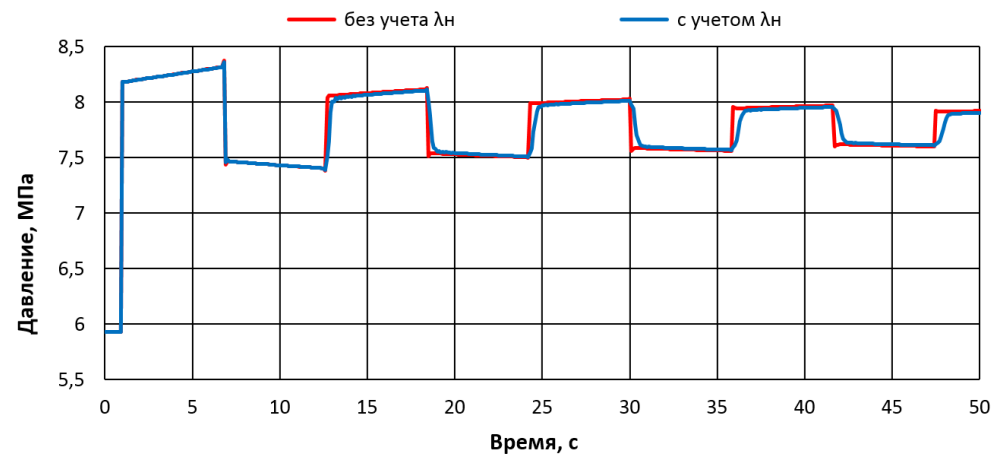


Рисунок 6 – Учет расчета коэффициента гидравлического трения для неустановившегося режима течения

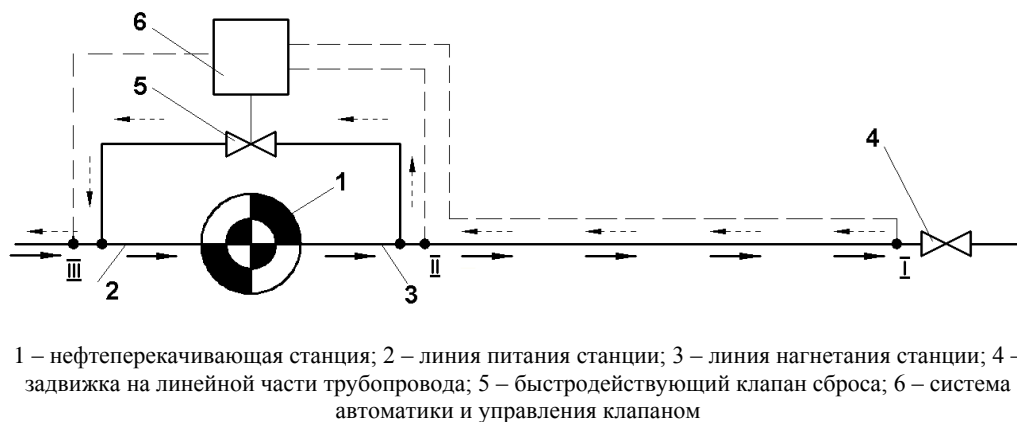


Рисунок 7 – Блок-схема устройства защиты от волн давления

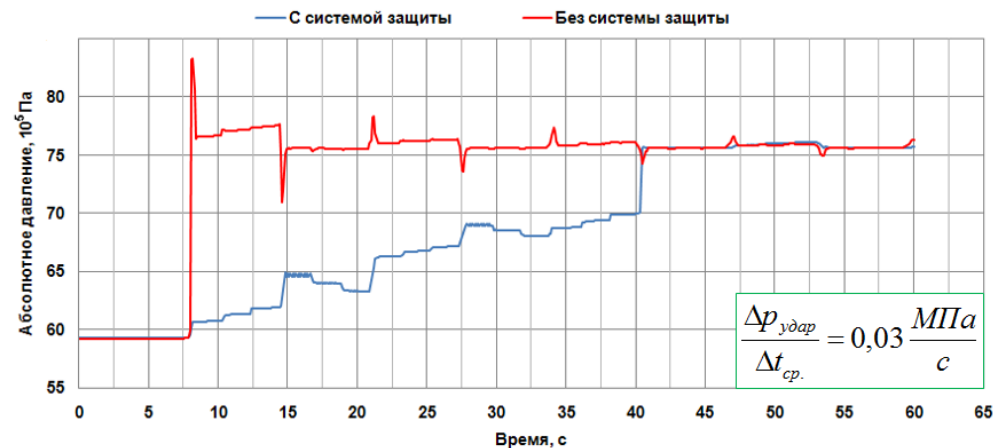


Рисунок 8 – Расчетный график сглаживания волны давления

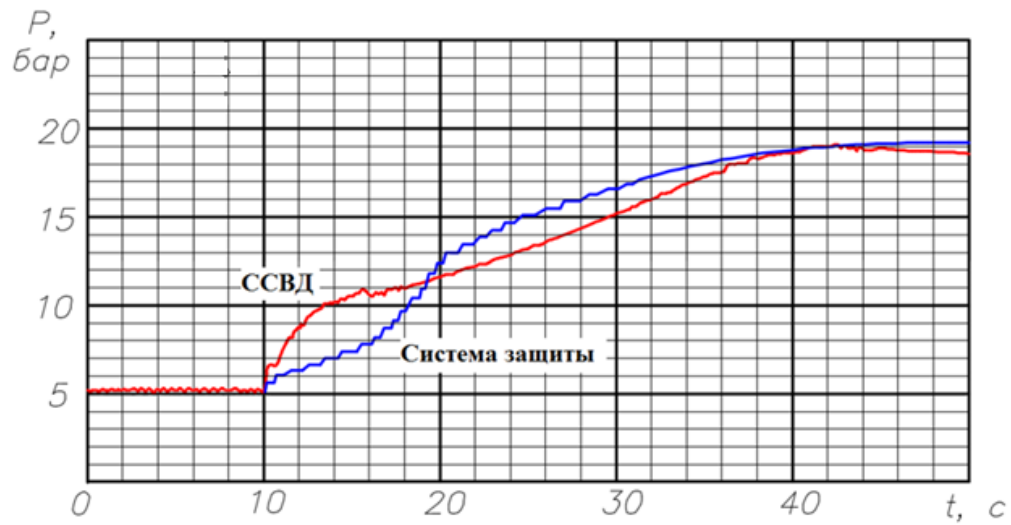
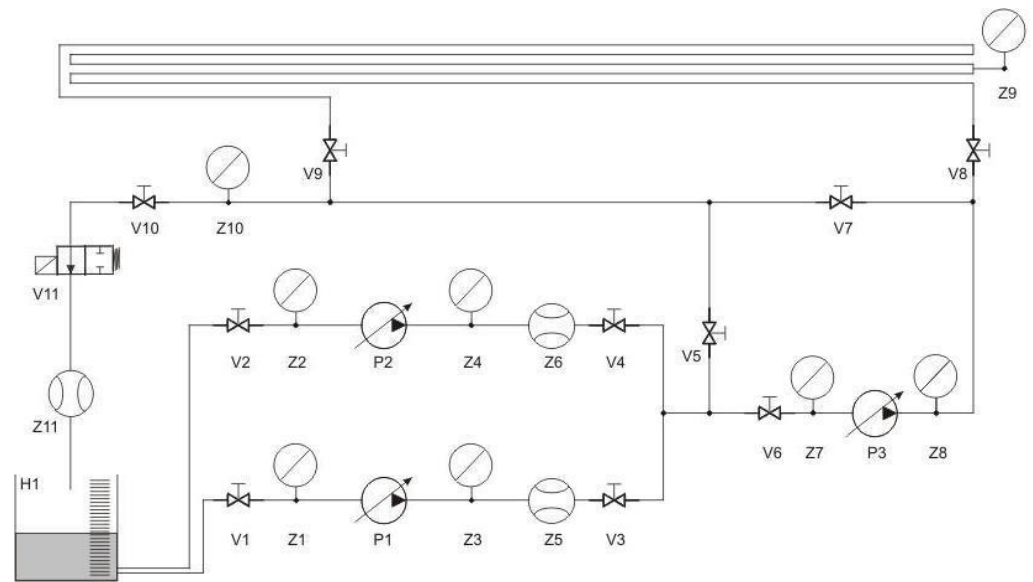


Рисунок 9 – Сравнение работы ССВД и предлагаемого устройства защиты



H1 – бак; P1, P2, P3 – регулируемые динамические насосы; V11 – клапан с электроуправлением; V1-V10 – отсечные клапаны с ручным управлением; Z1-Z4, Z7-Z10 – аналоговые датчики давления; Z5, Z6, Z11 – аналоговые датчики расхода

Рисунок 10 – Принципиальная гидравлическая схема стенда «Festo»

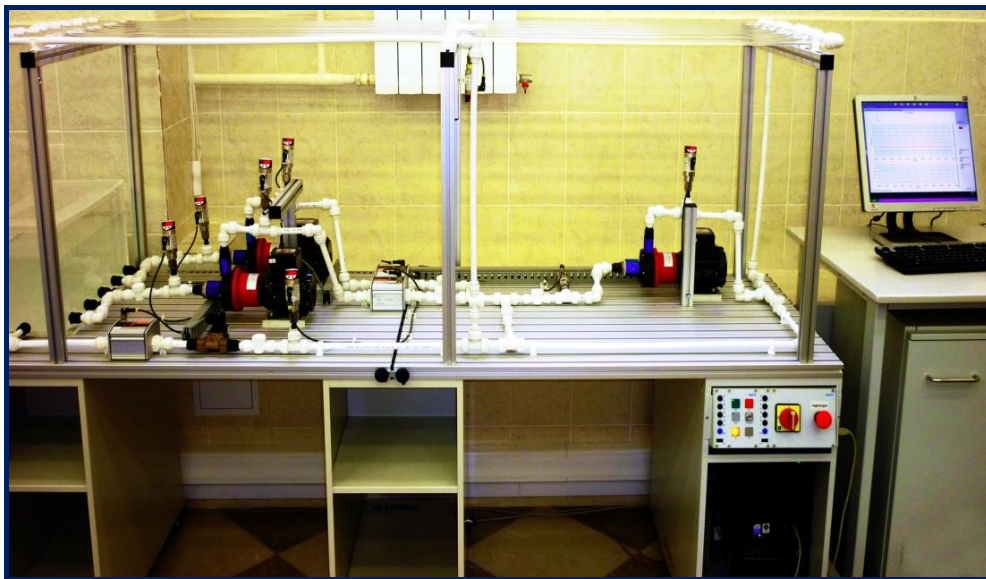


Рисунок 11 – Внешний вид стенда «Festo»

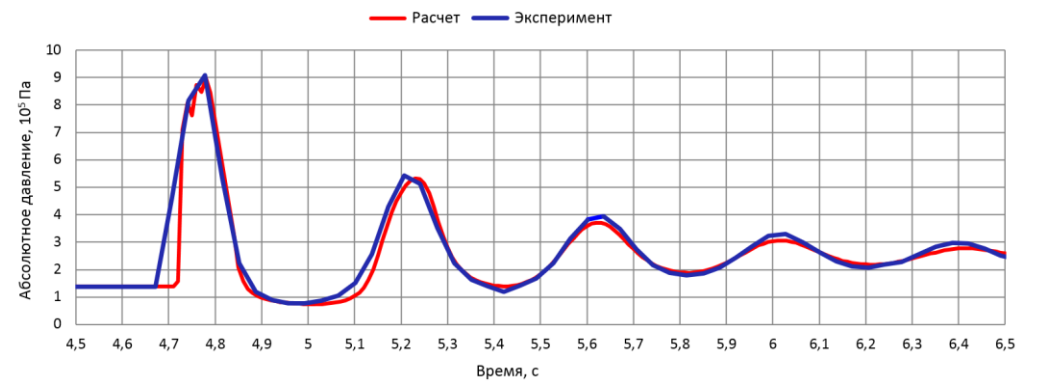
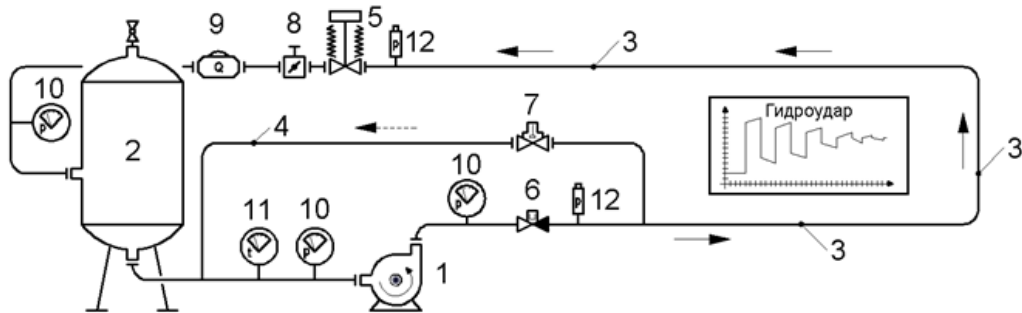


Рисунок 12 – Сравнение расчетных и экспериментальных результатов



1 – центробежный насос К20/30-У2; 2 – емкость (V=0,1 м³); 3 – трубопровод (сталь 20, 57×2,5 мм); 4 – байпас (сталь 20, 32×2,5 мм); 5 – отсекающий клапан (нормально открытый); 6 – обратный клапан подъемный; 7 – клапан сброса давления (нормально закрытый); 8 – затвор дисковый поворотный; 9 – расходомер; 10 – манометр; 11 – термометр; 12 – быстродействующий датчик давления (время отклика 10 мс).

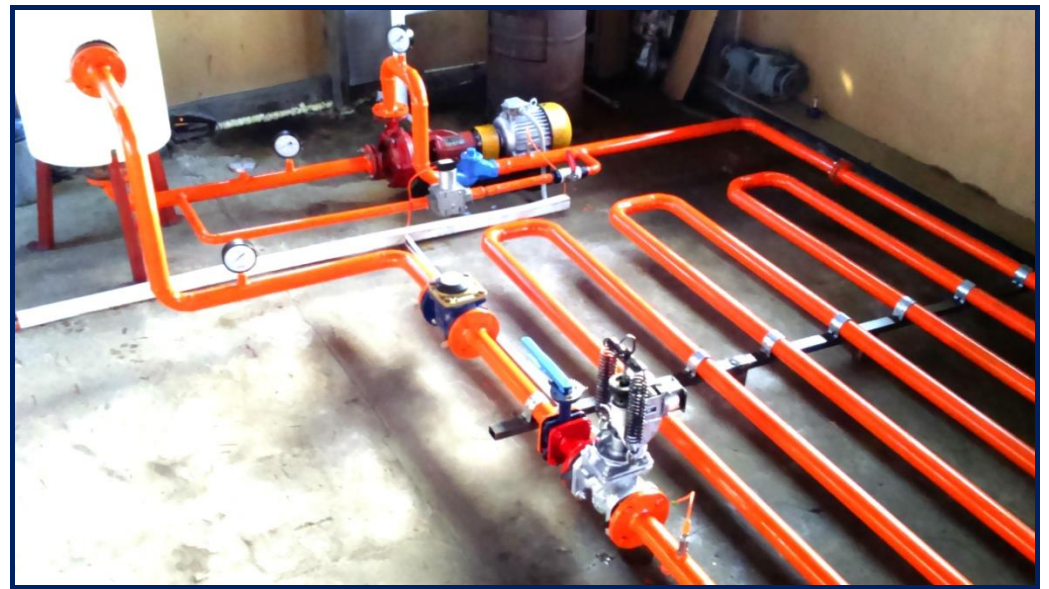


Рисунок 14 – Установка исследования гидроудара

Рисунок 13 – Технологическая схема установки исследования гидроудара

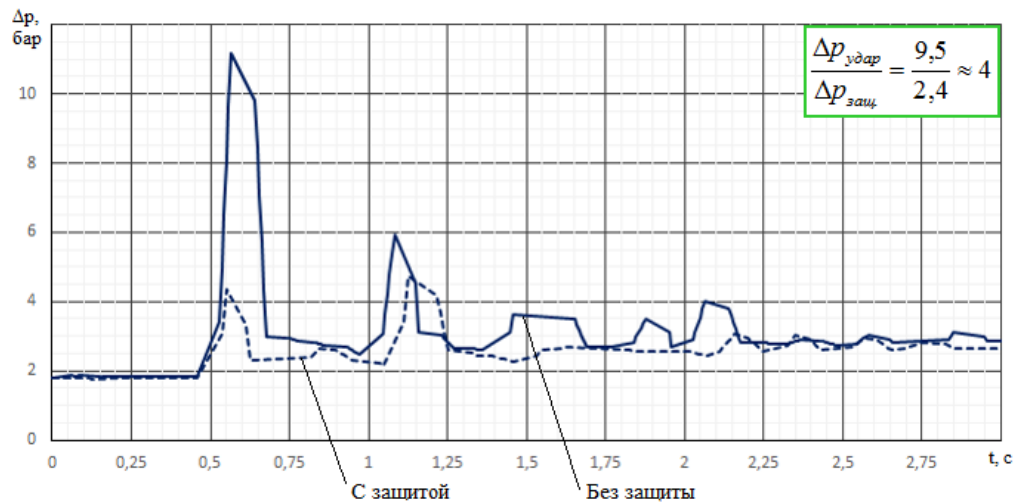


Рисунок 15 – Влияние устройства защиты на изменение давления в начале участка трубопровода при отсутствии обратного клапана

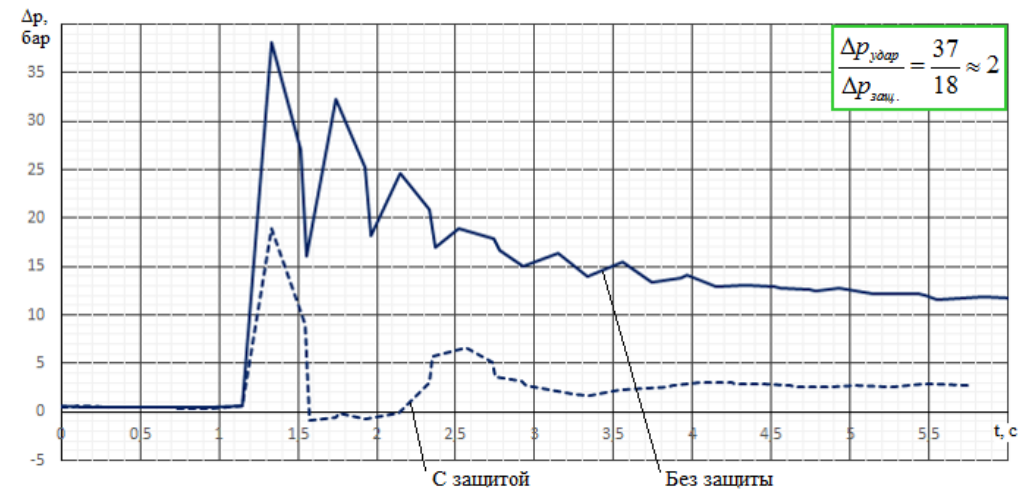


Рисунок 16 – Влияние устройства защиты на изменение давления в конце участка трубопровода при наличии обратного клапана