

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ДИОДОВ

А. Ю. Овсянников¹, Е. А. Дорофеев², Е. Н. Дубровский³

¹Восточно-Сибирское нефтегазопромысловое управление ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Россия, 629806, г. Ноябрьск, ул. Республики, 20

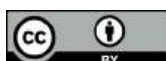
²Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

³Чаяндинское нефтегазопромысловое управление ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Россия, 629806, г. Ноябрьск, ул. Республики, 20

В статье рассматриваются основные причины снижения надёжности работы запорно-регулирующего оборудования конденсатопроводов, которые связаны с неравномерностью потока нефтепродукта, транспортируемого при различных режимах эксплуатации технологического оборудования. В качестве объекта исследования в работе рассматривается конденсатопровод для транспортировки нестабильного газового конденсата на участке от цеха первичной сепарации до установки его переработки, расположенных на объектах газоконденсатного месторождения. Предметом исследования является внутритрубный диодный элемент, который предлагается встраивать в конденсатопровод для снижения как перепада давлений, так и ударных нагрузок на запорно-регулирующее оборудование. Анализ целесообразности применения внутритрубного диодного элемента проводился на основе численного моделирования потока нефтепродукта в пакете современных прикладных программ. Полученные результаты представляют практическую ценность для инженерно-технических специалистов газотранспортных компаний, проектировщиков трубопроводных систем и разработчиков оборудования для нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: газоконденсатное месторождение, поток нефтепродукта, конденсатопровод, запорно-регулирующее оборудование, неравномерность потока, гидравлический диод.

Для цитирования: Овсянников А. Ю., Дорофеев Е. А., Дубровский Е. Н. Исследование технологических режимов работы конденсатопроводов с применением гидравлических диодов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 4. С. 71–79. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-71-79. EDN: EUQBFV.



© Овсянников А. Ю., Дорофеев Е. А., Дубровский Е. Н., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF THE TECHNOLOGICAL OPERATING REGIMES OF CONDENSATE PIPELINES UTILIZING HYDRAULIC DIODES

A. Yu. Ovsyannikov¹, E. A. Dorofeev², E. N. Dubrovskiy³

¹East Siberian Oil and Gas Production Directorate of LLC "Gazprom Dobycha Noyabrsk", Russia, Noyabrsk, Respubliki St., 20, 629806

²Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

³Chayandinskoye Oil and Gas Production Directorate of LLC "Gazprom Dobycha Noyabrsk", Russia, Noyabrsk, Respubliki St., 20, 629806

The article examines the main causes of reduced reliability of shut-off and control equipment in condensate pipelines, which are associated with uneven flow of petroleum products transported under various operating conditions of the process equipment. The study focuses on a condensate pipeline used for transporting unstable gas condensate from the primary separation plant to the processing unit, both located at gas condensate field facilities. The subject of the study is an in-line diode element, which is proposed for integration into the condensate pipeline to reduce both pressure drop and shock loads on the shut-off and control equipment. The feasibility of using an in-line diode element is analyzed using numerical modeling of petroleum product flow by a modern software package. The obtained results are of practical value to engineering and technical specialists at gas transportation companies, pipeline system designers, and equipment developers for the oil and gas industry.

Keywords: gas condensate field, oil product flow, condensate pipeline, shut-off and control equipment, flow irregularity, hydraulic diode.

For citation: Ovsyannikov A. Yu., Dorofeev E. A., Dubrovskiy E. N. Study of the technological operating regimes of condensate pipelines utilizing hydraulic diodes. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 4. P. 71–79. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-71-79. EDN: EUQBFV.



© Ovsyannikov A. Yu., Dorofeev E. A., Dubrovskiy E. N., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Надёжность оборудования для перекачки углеводородного конденсата, отделяемого от природного газа, является критически важным фактором для обеспечения бесперебойной работы газотранспортных систем. Особенности физико-химических свойств конденсата, склонность к образованию отложений, высокая вязкость, коррозионная активность и особенности эксплуатационных режимов работы технологического оборудования, неравномерность движения потока нефтепродуктов, наличие скачков расходов и перепадов давлений являются причиной ускоренного износа насосных агрегатов. Дополнительно совокупность указанных факторов приводит к частым ревизионным работам по обслуживанию фильтров, крана-регуляторов и иного запорно-регулирующего оборудования. В итоге увеличиваются эксплуатационные расходы и нагрузка на эксплуатирующий персонал, возрастает вероятность возникновения аварийных ситуаций, имеющих серьёзные экологические и экономические последствия. Среди приведённых негативных факторов выделим повышенный износ запорно-регулирующего оборудования и фильтрационных элементов по причине неравномерности потока жидкости и скачков перепада давлений.

На объектах добычи сырья с высоким газоконденсатным фактором типовым решением выше указанных проблем является первичная и дополнительная низкотемпературная сепарация газа [1]. Газ, поступающий из кустов газовых скважин, приходит в здание входных ниток (1), в котором устанавливаются блоки пробкоуловителя и сепаратора, где происходит предварительная осушка газа и обеспечивается защита оборудования от возможных жидкостных пробок из газосборной системы (рис. 1). Далее газ поступает на установку низкотемпературной сепарации (2), на которой отделяется остаточная влага за счёт применения дросселирующих устройств или турбодетандерных агрегатов, которые являются наиболее распространенным вариантом исполнения цехов осушки [2]. При соблюдении технологического режима и правильной работы сепарационного оборудования итоговое значение содержания капельной жидкости в потоке газа не должно превышать 5 мг/м^3 [3]. Осушенный газ товарного качества подается через узел замера (3) на центральную дожимную компрессорную станцию (4) для компримирования и последующей реализации потребителю (5). Отделившаяся жидкость представляет собой смесь конденсата газового нестабильного (КГН) и жидкости, в том числе пластовой воды, которая далее подается на установку стабилизации конденсата (6) с целью последующей переработки и дальнейшей её реализации.

В рамках описанной технологической схемы подготовки газа имеются следующие проблемные

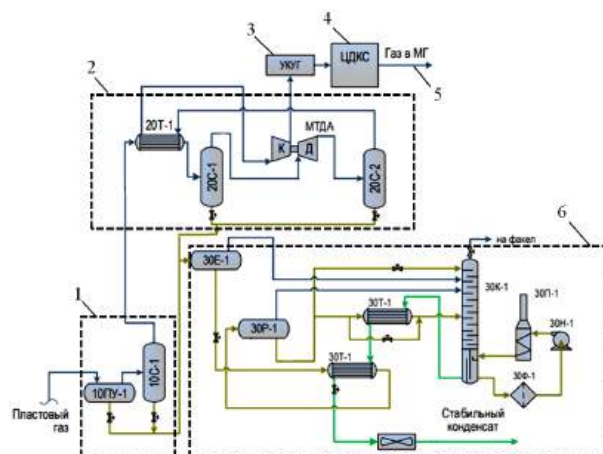


Рис. 1. Типовая схема установки подготовки газа
Fig. 1. Typical diagram of the gas preparation

особенности. Давление на линии подготовки газа не должно быть меньше минимально допустимого давления на входе в компрессорный агрегат, при этом на дросселирующем устройстве необходимо создать перепад давлений для отделения капельной жидкости. С учётом применяемого оборудования и потерь давления значение рабочего давления в здании входных ниток и низкотемпературной сепарации составляет порядка $6,0–6,5 \text{ МПа}$. При этом отделившаяся жидкая фаза, поступающая на установку стабилизации конденсата, не может превышать давление свыше $2,5 \text{ МПа}$ с целью обеспечения оптимального технологического режима работы для обеспечения низкого параметра металлоёмкости и стоимости отдельных установок промысла. Таким образом, для обеспечения безаварийной работы промысла на кранах регуляторах жидкостных линий подачи КГН создается перепад давления не менее $3,5 \text{ МПа}$. Согласно паспортным показателям, максимально допустимый перепад давления на установленных кранах-регуляторах составляет до $4–6 \text{ МПа}$. Следует отметить, что регулярные повышенные значения перепада давлений и наличие механических примесей в потоке негативно сказываются на работе крана-регулятора, что приводит к частым отказам и периодическим внеплановым ревизиям оборудования.

В научно-технической литературе [4–6] известны и другие варианты повышения надёжности работы запорно-регулирующего оборудования.

В качестве способа повышения надёжности крана-регулятора в работе [4] предложена конструкция шарового крана с подвижной подпружиненной втулкой, которая поджата пакетом тарельчатых пружин и герметизирована металлической мембраной. Седла клапана предлагается использовать

из фторопластового материала, что повышает общую надёжность конструкции. Подобное решение позволяет повысить надёжность и герметичность крана-регулятора, особенно при больших перепадах давлений. В работе [5] авторами уделяется внимание защитному покрытию рабочих поверхностей шаровых кранов. Эксплуатация запорной и регулирующей арматуры с применением покрытия в виде слоя оксида алюминия для повышения износа и коррозионной стойкости позволяет увеличить срок службы оборудования без внесения существенных изменений в конструкцию. В научно-технической литературе встречаются предложения по применению в промышленности шарового крана-регулятора с балансировочной пружиной и устройством регулирования [6]. За счёт объединения функций крана и регулятора давления снижается сложность конструкции технологических линий, на которых возможно применение подобных кранов, и повышается надёжность запорно-регулирующего узла.

В рассмотренных вариантах повышения надёжности запорно-регулирующего оборудования авторы предлагают изменения или предложения, связанные с доработкой или модернизацией конструкции оборудования. Однако на действующих месторождениях внесение изменений, не согласованных с проектным институтом, строго запрещено. Применяемое оборудование должно соответствовать критериям оценки, а в некоторых случаях входить в перечень единого реестра материально-технических ресурсов ПАО «Газпром». На практике, при проявлении снижения надёжности оборудования по причине повышенных перепадов давлений, применяется методика искусственного занижения проходного сечения участка в местах наличия фланцевых соединений за счёт установки диафрагм или шайб, обеспечивающих эффект дросселирования [7]. Шайба представляет собой металлический диск с калиброванным отверстием, который устанавливается между фланцами участка трубопровода. При прохождении нефтепродукта через сужающееся сечение скорость потока нефтепродукта увеличивается, давление снижается, а часть энергии потока рассеивается в виде тепла. Для осуществления подбора шайбы используются специализированные программы, например, HydraulicCalc, PipeFlow или нормативные документы (ГОСТ, API). Преимущества применения шайб — простота конструкции и монтажа, высокая надёжность за счёт отсутствия подвижных частей, низкие затраты на изготовление и обслуживание, продолжительный срок службы. Недостатки применения шайб — невозможность оперативной регулировки, требуется остановка системы для замены шайб, большие потери энергии, риск возникновения явления кавитации при больших перепадах давления [7].

Приведённые в литературе [4–7] способы повышения надёжности эксплуатации кранов-регуляторов и иного запорно-регулирующего оборудования обладают рядом преимуществ и недостатков. Однако существует ещё один класс гидравлических устройств, описанных в научно-технической литературе [8–12], который может быть использован взамен дросселирующих шайб. В работе [8] описывается гидравлический диод диафрагменного типа, который за счёт своей конструкции, обеспечивает большее гидравлическое сопротивление при течении жидкости в обратном направлении, чем при течении жидкости в прямом направлении. В работе

[9] описываются конструкции с применением набора цилиндрических вставок в элементы трубопровода, которые выполнены в единичном исполнении. Подобные разновидности гидравлических диодов относятся к сопловым или диффузорным, а их принцип работы также основан на увеличении гидравлического сопротивления обратного потока жидкости. В работе [10] авторы рассматривают трубопроводные системы подготовки пробы теплоносителя, в которых широко применяются наборы дросселирующих шайб диаметром менее 1 мм. Однако из-за недостаточной чистоты теплоносителя и облитерации проходного сечения шайб подобные устройства обладают низкой надёжностью и требуют затрат на их периодическое обслуживание. Поэтому авторы исследуют характеристики вихревого гидравлического дросселя с целью его применения в системах подготовки проб теплоносителя. В работе [11] автор исследует модель механизма перемещения исполнительного органа с дополнительным демпфером в виде гидравлического диода. Основная идея работы заключается в снижении влияния и неравномерного расхода рабочей жидкости и пульсаций давления на плавность хода исполнительного органа. В работе [12] авторы исследуют зависимость гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса при течении рабочего тела через гидравлический диод, который может применяться в напорной гидравлической линии и обеспечивать снижение вероятности возникновения гидроудара или применяться в качестве выпрямляющих элементов в линии нагнетания гидронасосов.

На основе проведённого литературного анализа можно сделать вывод, что идея применения гидравлических диодов в качестве элемента трубопроводной или гидравлической системы является не новой, в определённой степени изученной и имеет перспективы реального применения. В связи с чем считается целесообразным рассмотреть возможность внедрения гидравлического диода на участок конденсатопровода с целью плавного или ступенчатого снижения перепада давлений, за счёт которого в итоге будет повышаться надёжность и вероятность безотказной работы запорно-регулирующего оборудования конденсатопровода.

Основная часть

Рассмотрим возможность применения гидравлического диода в рабочей среде нестабильного газового конденсата на участке конденсатопровода, соединяющего цех предварительной осушки газа и низкотемпературной сепарации с установкой стабилизации конденсата нефтегазоконденсатного месторождения. Схема внутритрубного элемента, представляющего собой участок трубы с гидравлическими диодами, представлена на рис. 2. Жидкостной поток нестабильного нефтепродукта при прохождении через конденсатопровод (4) попадает во внутритрубный диодный элемент. При прохождении конусного элемента (3) внутритрубного диодного элемента (2) потенциальная энергия давления жидкости преобразуется в кинетическую энергию потока, следовательно, скорость течения возрастает, а давление снижается, что напрямую следует из энергетического смысла уравнения Бернулли для потока реальной жидкости. Приблизённо перепад давлений на участке с гидравлическими диодами можно определить из теоретической формулы для определения перепада давлений на дроссельной

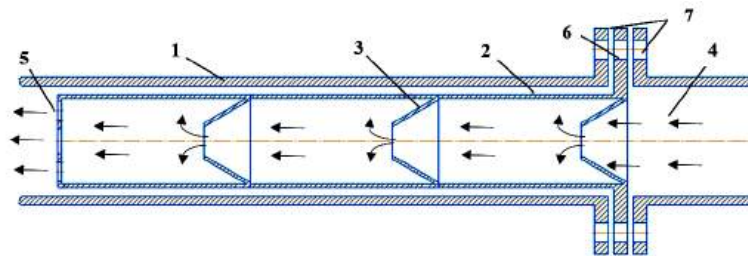


Рис. 2. Внутритрубный элемент с диодными элементами:
1 — конденсатопровод; 2 — внутритрубный диодный элемент;
3 — диодные пластины; 4 — нефтепродукт; 5 — выпрямитель потока;
6 — крепежный фланец; 7 — ответные фланцы элементов конденсатопровода
Fig. 2. In-pipe element with diode elements:
1 — condensate line; 2 — in-pipe diode element;
3 — diode plates; 4 — oil product; 5 — flow straightener;
6 — mounting flange; 7 — mating flanges of condensate line elements

шайбе, которое получено из уравнения расхода жидкости через отверстие:

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{\alpha \cdot S} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2}, \quad (1)$$

где Q — объёмный расход жидкости; α — коэффициент расхода; S — площадь проходного сечения трубопровода; ρ — плотность жидкости.

На выходе из диодного элемента располагается выпрямитель потока (5), а внутритрубный диодный элемент крепится на фланцевом соединении (6–7), что делает его универсальным при размещении в трубопроводных системах.

Рассмотрим применение предложенной конструкции в технологической линии конденсатопровода (рис. 3). Как уже было сказано ранее, в результате первичного отделения жидкости в це-хе входных ниток и пробкоуловителей жидкост-ной поток отводится для дальнейшего разделения. Фаза пластовой жидкости отводится для утилиза-ции, фаза насыщенного водометанольного раство-ра (ВМР) отводится для дальнейшего использова-ния, фаза нестабильного газового конденсата (КГН) отводится для подготовки до товарного состояния и реализации. На рис. 3 представлена упрощенная технологическая схема отвода жидкости из блока пробкоуловителей с сепараторами. Запорно-регу-лирующее оборудование и фильтр тонкой очистки установлены с использованием фланцевых соеди-нений, что позволяет расположить внутритруб-ный элемент локально в различных местах схемы. Предлагается размещение диодного элемента после фильтра, по причине возможного засорения диода при размещении до первичной фильтрации потока. Поскольку на выходе диода размещены успокоите-ли потока, исключен риск получения погрешности на датчиках, расположенных после фильтра по ходу движения жидкостного потока.

Рассмотрим эксплуатационные показатели рабо-ты технологической линии транспортировки КГН и насыщенного ВМР для определения усредненных граничных условий с целью дальнейшего постро-ения расчётной модели.

Жидкость, отделившаяся в сепарационном обо-рудовании, поступает неравномерно во входную линию конденсатопровода, что в первую очередь связано с наличием жидкостных пробок, периоди-чески поступающих на входные коллекторы при изменении технологических режимов газосбор-ных сетей и скважин, во-вторых, по причине на-



Рис. 3. Схема размещения исследуемого внутритрубного диода
Fig. 3. Scheme of the in-pipe diode location



Рис. 4. График изменения расхода жидкости в технологической линии
Fig. 4. Graph of liquid flow rate changes in a process line

личия низменностей на линейных участках трубо-проводов, приводящих к накопительному эффекту. Из анализа графика, представленного на рис. 4, видно, что в жидкостной линии имеются ярко выраженные скачкообразные изменения объём-ного расхода, не имеющие четкой графической интерполяции. Если рассмотреть суточный ана-лиз расходно-напорных характеристик, то график будет иметь схожий характер. Следует отметить, что с целью получения более точных результатов из расчёта следует исключить мгновенные измене-ния расхода с амплитудой в несколько тысяч куби-ческих метров. В то же время изменение давления в жидкостной линии на входе в конденсатопровод (рис. 5), имеет практически статичный характер, поскольку значительные изменения давления мо-гут привести к изменению технологического режи-ма работы оборудования переработки конденсата и увеличенным показателям технологических по-терь. Однако данный параметр снимается после



Рис. 5. График изменения давления на входе в конденсатопровод

Fig. 5. Graph of pressure change at the inlet of the condensate pipeline



Рис. 6. График изменения температуры на входе в конденсатопровод

Fig. 6. Graph of temperature change at the inlet of the condensate pipeline



Рис. 7. График изменения давления на выходе из конденсатопровода

Fig. 7. Graph of pressure change at the outlet of the condensate pipeline

регулятора давления, а основные перепады, связанные с залповыми поступлениями жидкости во входной коллектор, происходят на оборудовании до регулятора, тем самым его нагружая.

Температура отделившейся жидкости напрямую зависит только от внешних погодных условий, таким образом, проанализировав тренды, представленные на рис. 6, можно увидеть динамику увеличения температурного диапазона начиная с апреля – мая, в период первичного весеннего увеличения температуры. При этом всплески температуры с октября связаны с остановкой линии и её естественным нагревом. Исследование технологического режима работы с изменением температуры потока на данном этапе не проводится.

Как было сказано ранее, смесь конденсата и ВМР, минуя регулятор давления, выходит практически на статический режим по давлению в технологической линии. При этом можно условно наблюдать, как снижается давление рабочей среды с 60 кгс/см² на первичном регуляторе до 25 кгс/см² на буферной емкости, которая служит успокоителем потока. Если посмотреть тренды в совокупности (рис. 7), можно сделать вывод, что в некоторые вре-



Рис. 8. Трёхмерная модель исследуемого внутритрубного диодного элемента

Fig. 8. Three-dimensional model of the in-pipe diode element

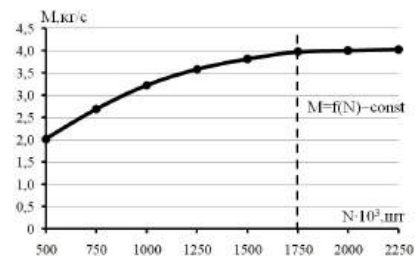


Рис. 9. Анализ сеточной устойчивости

Fig. 9. Mesh stability analysis

менные отрезки степень снижения давления может быть до 1,5 раза выше, что подтверждает негативное влияние данного параметра на кран-регулятор.

Анализ работы гидравлического диода на участке конденсатопровода проводился путём численного моделирования, трёхмерного, стационарного течения потока жидкости. Для реализации численной модели использовался программный комплекс ANSYS Fluent. Алгоритм выполнения численного расчёта базировался на примерах гидродинамических расчётов [13]. Общая последовательность действий при реализации численного расчёта заключается в построении трёхмерной геометрической модели, генерации расчётной сетки, выбора типа рабочей жидкости и её физических свойств, задании начальных и граничных условий, визуализации полученных результатов.

На рис. 8 представлена 3D-модель внутритрубного диодного элемента диаметром 89 мм и длиной 456 мм со стороны втекающего и вытекающего потока жидкости, имитируется часть трубопровода диаметром, равным 89 мм.

Для реализации численных расчётов была сгенерирована трёхмерная неструктурированная сетка с формой ячейки в виде тетраэдра, выбор которой обусловлен сложной пространственной геометрией диодного элемента.

Генерация сетки осуществлялась методом «patch conforming method», который обеспечивает качественное построение сетки для геометрической модели, содержащей как крупные, так и мелкие элементы. Физические параметры сетки (physics preference), оптимизирующие процесс её построения, были настроены под решение CFD задач.

Оптимальное число ячеек сетки определялось на основе анализа сеточной устойчивости. На рис. 9 показан график зависимости массового расхода жидкости от числа ячеек сетки. Анализ графической зависимости позволяет сделать вывод, что при числе ячеек сетки более 1,75 млн штук, характер изменения массового расхода стремится к установившемуся состоянию. Полагая, что результаты сеточной устойчивости для расхода жидкости 4 кг/с будут справедливы и для других расходов. Принимаем размер ячейки сетки 1,5 мм, обеспечивающий

Таблица 1. Численные значения граничных условий
Table. 1. Numerical values of boundary conditions

№ расчётной точки	Давление, МПа	Расход, м³/ч (кг/с)	Температура, °С
1	6,48	13,57 (2,82)	– 20
2	6,49	29,70 (6,18)	– 20
3	6,36	59,08 (12,31)	– 20
4	6,30	73,44 (15,30)	– 20

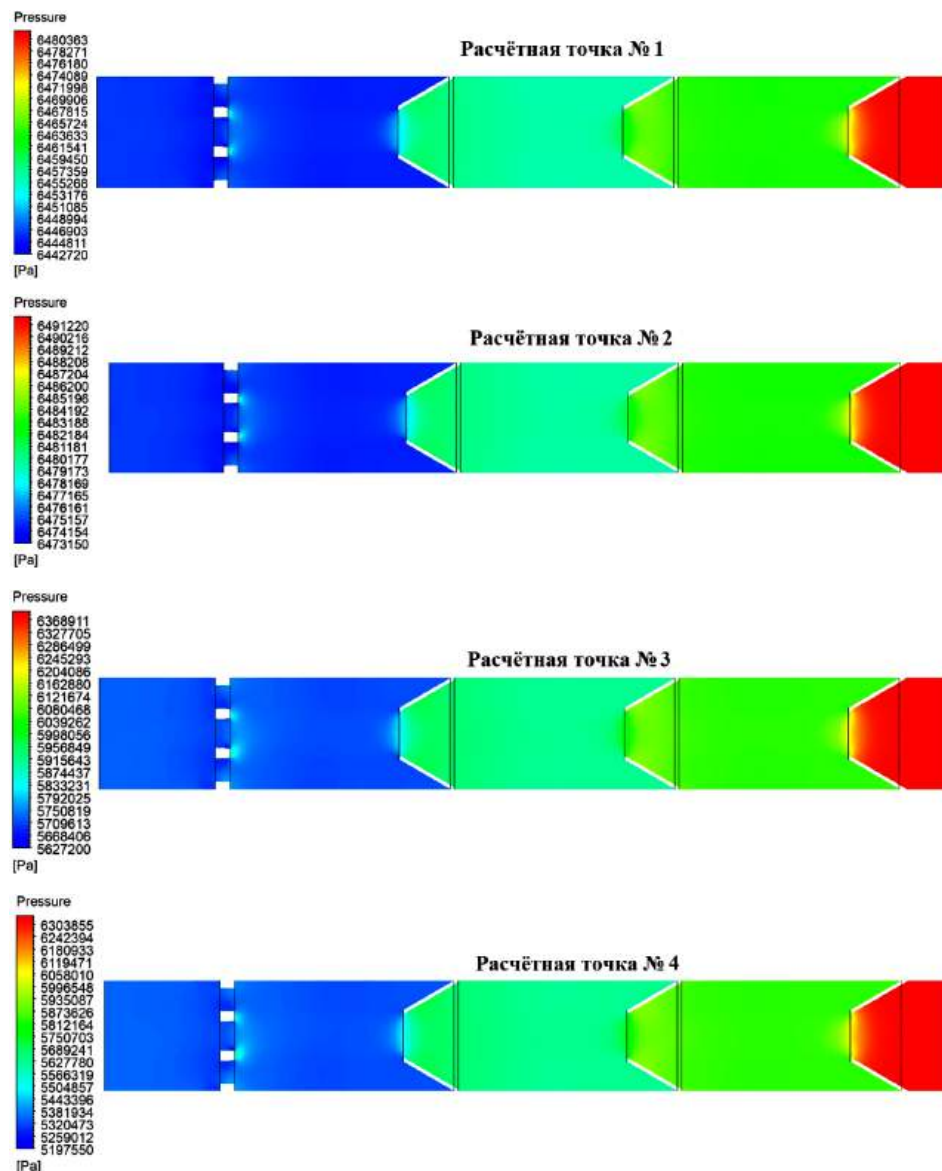


Рис. 10 Градиент распределения давлений по длине внутритрубного диодного элемента
Fig. 10. Gradient of pressure distribution along the length of the in-pipe diode element

число расчетных элементов 1,69 млн штук. Анализ качества построенной сетки осуществлялся по следующим параметрам: среднее значение деформации ячейки сетки (Skewness) не превышало 0,56, aspect-ное отношение (Aspect Ratio) составляет менее 16, степень ортогональности граней ячейки (Minimum orthogonal quality) составляет 0,62 [14–15].

В качестве рабочего тела используется модель жидкости, имитирующая поток нефтепродукта с физическими параметрами динамической вязкости 0,01125 Па·с и плотности 750 кг/м³.

Программный комплекс Fluent позволяет осуществлять моделирование потоков жидкости с применением различных моделей турбулентности.

В научно-технической литературе можно встретить различные описания и рекомендации по поводу выбора той или иной модели. Однако более значимый вес имеют реальные практические исследования. Так, например, в статье [16] представлен график зависимости изменения диодности гидродиода от давления нагнетания жидкости, полученный на основе моделирования потока жидкости численным методом и на основе экспериментальных исследований. Авторы статьи [16] утверждают, что модель турбулентности k- ω имеет наименьшее среднеквадратичное отклонение в сравнении с реальным экспериментальным исследованием. Следовательно, для моделирования течения жидкости

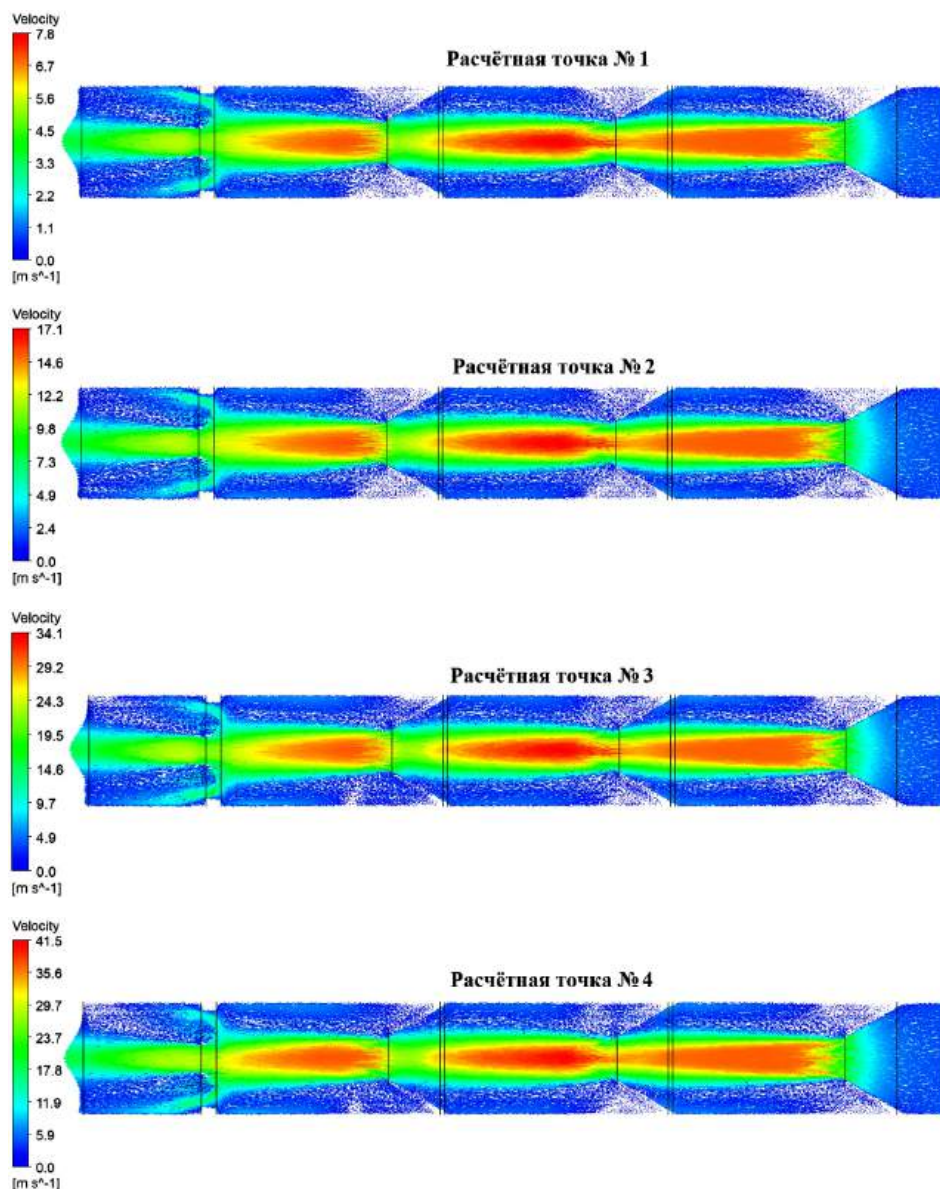


Рис. 11 Векторное распределение скоростей по длине внутритрубного диодного элемента
Fig. 11. Vector distribution of velocities along the length of an in-pipe diode element

во внутритрубном диодном элементе используется модель турбулентности k- ω .

В качестве граничных условий на входе в исследуемый внутритрубный элемент задаётся абсолютное давление втекающего потока жидкости. На выходе из гидродиода задаётся массовый расход жидкости, вытекающего потока. Численные значения граничных условий взяты из технологических выгрузок рабочих параметров потока конденсата. Из всего массива данных было выбрано 4 точки (табл. 1), представляющие собой параметры потока жидкости при возникновении резких скачков потока, который имеет циклический характер в течение суточного интервала перекачки жидкости. Точки получены как наиболее часто встречающиеся согласно анализу трендов технологических режимов оборудования конденсатопровода, исключая резкие скачки с шагом в 1000 $\text{м}^3/\text{час}$ и более. Подобные трендовые изменения могут быть ошибочными в рамках помех работы оборудования телемеханики.

При осуществлении моделирования потока жидкости считается, что рабочая жидкость полностью заполняет все пространство исследуемой геометрии.

Температура рабочей жидкости одинакова во всех точках рабочей жидкости. На стенках трёхмерной модели задаётся условие прилипания жидкости, шероховатость поверхности принимается равномернозернистой, с высотой шероховатости 50 мкм. Количество расчётных итераций выбиралось на основе сходимости по массовому расходу входящего и выходящего потока жидкости. В ходе проведения расчётов было установлено, что при числе расчётных итераций в ≈ 1000 сходимость имела линейный характер и численное значение массового расхода было неизменным от дальнейших расчётных итераций.

На рис. 10 представлены контуры распределения давления жидкости в плоскости, проходящей через ось внутритрубного элемента. Из полученных результатов видно, что давление жидкости ступенчато снижается после каждой пары внутренних пластин. При низких расходах жидкости (расчётная точка № 1, $M = 2,82 \text{ кг/с}$) снижение давления составляет 0,04 МПа, что является весьма несущественным. При более высоких расходах жидкости (расчётная точка № 4, $M = 15,30 \text{ кг/с}$), снижение давления составляет 1,1 МПа, что является вполне существен-

ным значением. Подобный характер изменения перепада давлений соответствует уравнению расхода жидкости (1).

При постоянном значении коэффициента расхода α и площади проходного сечения S с увеличением массового расхода жидкости будет увеличиваться перепад давления на участке внутритрубного диодного элемента.

На рис. 11 представлено векторное распределение скоростей в плоскости, проходящей через ось трубопровода, и в двух симметрично расположенных плоскостях, удалённых на 10 и 20 мм соответственно от оси трубопровода. Поток жидкости движется в виде сужающейся струи, которая сохраняет свою форму на всем протяжении исследуемого трубопровода. Максимальная скорость течения потока жидкости находится в центральной части турбулентного ядра потока и составляет около 8 и 41 м/с соответственно для первой и четвертой расчётной точки. При этом центральное турбулентное ядро проходит через все секции диода и снижается по интенсивности только на успокоителе. На периферийной части трубопровода наблюдается интенсивное завихрение жидкости и возникновение обратных потоков. Успокоитель потока делит жидкость на несколько потоков, которые, затем соединяясь, двигаются далее по трубопроводу со средней скоростью 1 и 4 м/с для расчётных точек № 1 и 4 соответственно.

Заключение

По результатам проведенных математических расчетов с использованием программного комплекса ANSYS были получены положительные результаты в части применения диодного элемента в системе трубопроводного транспорта перекачки нестабильного конденсата. Существенное снижение ударных нагрузок на запорную и регулируемую арматуру достигается при значительных скачках расхода (более 60 м³/ч). В этом случае наблюдается снижение рабочего давления ≈ 1 МПа в момент резкого увеличения расходной характеристики. Снижение нагрузки позволит увеличить интервал проведения планово-предупредительных работ по обслуживанию арматуры, тем самым снизить нагрузку на работников промысла. Следующим этапом исследования будет изменение технологических режимов работы в более широком рабочем диапазоне при моделировании нестационарного потока с целью получения интерполяционной картины и нахождения оптимального значения числа пластин диода, а также расстояния между диодными элементами и их угол наклона. Исследуемая модель не влечет к изменению конструкции технологических устройств конденсатопровода, может размещаться вне зависимости от применяемого оборудования. Следующим этапом работы является более углубленная проработка геометрии диода, а также сборка и получение экспериментального образца для проведения натурных испытаний на технологической линии промыслового трубопровода.

Список источников / References

1. Манихин О. Ю., Шалай В. В., Ходорева Е. В. Выбор способа подготовки природного газа для транспортировки по магистральным газопроводам // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С. 58–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-58-65. EDN: ERRLJO.

Manikhin O. Yu., Shalay V. V., Khodoreva E. V. Vybora sposoba podgotovki prirodnogo gaza dlya transportirovki po magistral'nym gazoprovodam [Selection the method of natural gas preparation for transportation through main gas pipelines]. Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 58–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-58-65. EDN: ERRLJO. (In Russ.).

2. Кубанов А. Н., Воронцов М. А., Федулов Д. М., Глазунов В. Ю. Технологический анализ работы турбохолодильной техники на начальном этапе эксплуатации УКПГ-2 Бованенковского НГКМ // Вести газовой науки. 2013. № 4 (15). С. 84–89. EDN: RTEYZZ.

Kubanov A. N., Vorontsov M. A., Fedulov D. M., Glazunov V. Yu. Tekhnologicheskii analiz raboty turbokholodil'noy tekhniki na nachal'nom etape ekspluatatsii UKPG-2 Bovanenkovskogo NGKM [Technological analysis of turbo-refrigeration equipment operation at the initial stage of UKPG-2 of the Bovanenkovo oil, gas, and condensate field]. Vesti Gazovoy Nauki. 2013. No. 4 (15). P. 84–89. EDN: RTEYZZ. (In Russ.).

3. СТО Газпром 089–2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. Введ. 08–08–2011. Москва: ОАО Газпром, 2010. 12 с.

STO Gazprom 089–2010. Gaz goryuchiy prirodnyy, postavlyayemyy i transportiruyemyy po magistral'nym gazoprovodam. Tekhnicheskiye usloviya [Combustible natural gas supplied and transported through main gas pipelines. Technical specifications]. Moscow, 2010. 12 p. (In Russ.).

4. Пат. 86691 Российская Федерация, МПК F16K 5/20. Шаровый кран // Дмитриев А. И., Закота А. И., Карпов С. И. [и др.]. № 2009119568/22; заявл. 26.05.2009; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

Patent No. 86691 Russian Federation, IPC F16K 5/20. Sharovyy kran [Ball Valve] // Dmitriyev A. I., Zakota A. I., Karpov S. I. [et al.]. No. 2009119568/22. (In Russ.).

5. Пат. 56535 Российская Федерация, МПК F16K 5/16. Шаровой кран // Тихонков А. С., Швецов В. Б., Тихонков А. А. № 2006107155/22; заявл. 10.03.2006; опубл. 10.09.2006, Бюл. № 25.

Patent No. 56535 Russian Federation, IPC F16K 5/16. Sharovyy kran [Ball valve] // Tikhonkov A. S., Shvetsov V. B., Tikhonkov A. A. No. 2006107155/22. (In Russ.).

6. Пат. 2799157 Российская Федерация, МПК F16K 5/20. Шаровой кран — регулятор давления // Бумажнов Д. В., Дворянkin С. А., Бормашев Е. А. № 2023109103; заявл. 11.04.2023; опубл. 04.07.2023, Бюл. № 19.

Patent No. 2799157 Russian Federation, IPC F16K 5/20. Sharovyy kran — regul'yator davleniya [Ball valve pressure regulator] // Bumazhnov D. V., Dvoryankin S. A., Bormashev E. A. No. 2023109103. (In Russ.).

7. Иголкин А. А. Снижение шума и виброакустических нагрузок трубопроводных систем газораспределительных станций // Journal of Dynamics and Vibroacoustics. 2014. № 1. С. 28–33. EDN: XKQSVB.

Igolkin A. A. Snizhenie shuma i vibroakusticheskikh nagruzok truboprovodnykh sistem gazoraspredeletel'nykh stancij [Reduction of noise and vibroacoustic loads of pipeline systems of gas distribution stations]. Journal of Dynamics and Vibroacoustics. 2014. Vol. 1. P. 28–33. EDN: OUNXDZ. (In Russ.).

8. Letham D. L. Fluidic system design. Mashing Design. 1966. Vol. 18. P. 210–218.

9. Кайгородов С. Ю. Разработка конструкции и исследование рабочих процессов диафрагменного диода, предназначенного для работы в прямоугольном роторном насосе: автореф. дис. ... канд. наук. Омск, 2022. 24 с.

Kaigorodov S. Yu. Razrabotka konstruksii i issledovaniye rabochikh protsessov diafragmennogo dioda, prednaznachennogo dlya raboty v pryamozubom rotornom nasose [Development of a design and study of the operating processes of a diaphragm diode

intended for operation in a spur rotary pump]. Omsk, 2022. 24 p. (In Russ.).

10. Гимадиев А. Г., Уткин А. В. Исследование характеристик вихревого гидравлического дросселя для систем подготовки проб теплоносителя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2015. Т. 14, № 4. С. 110–117. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-110-117. EDN: VHRWEN.

Gimadiyev A. G., Utkin A. V. Issledovaniye kharakteristik vikhrevogo gidravlicheskogo drosselya dlya sistem podgotovki prob teplonositelya. [Study of characteristics of the vortex throttling valve for the system of water sample conditioning]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 14, no. 4. P. 110–117. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-110-117. EDN: VHRWEN. (In Russ.).

11. Кайгородов С. Ю. Модель рабочего процесса механизма подъема и опускания стрелы с дополнительным демпфером в виде гидродиода // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 2. С. 52–57. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-52-57. EDN: MHMTWN.

Kaigorodov S. Yu. Model' rabocheho protsessa mekhanizma pod'yema i opuskaniya strely s dopolnitel'nyy dempferom v vide gidrodioda [The model of working process of the boom lifting and lowering mechanism with an additional damper in the form of hydrodiode]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2023. Vol. 7, no. 2. P. 52–57. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-52-57. EDN: MHMTWN. (In Russ.).

12. Khabarova D. F., Podzerko A. V., Spiridonov E. K. Experimental Investigation of Fluidic Diodes. *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 93–98. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.443. EDN: XNQTRX.

13. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. Основы работы в ANSYS 17. Москва: ДМК Пресс, 2017. 210 с. ISBN 978-5-97060-425-0.

Fedorova N. N., Val'ger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. Osnovy raboty v ANSYS 17 [Basic principles of ANSYS 17]. Moscow, 2017. 210 p. ISBN 978-5-97060-425-0. (In Russ.).

14. Matsson J. E. An introduction to ANSYS Fluent 2021. SDC Publications, 2021. 552 p. ISBN: 978-1-63057-462-8.

15. Ansys fluent tutorial guide. Southpointe, 2011 URL: https://www.sylvain-serra.fr/res/fluent_tuto.pdf (accessed: 20.11.2025).

16. Shcherba V., Kaigorodov S., Dorofeev E. Development and research of diaphragm hydrolic diode for positive displacement pumps. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. Vol. 53. P. 1–20. DOI: 10.1080/15397734.2024.2374452.

ОВСЯННИКОВ Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог Восточно-Сибирского нефтегазопромыслового управления ООО «Газпром добыча Ноябрьск», г. Ноябрьск.

SPIN-код: 6210-7357

AuthorID (РИНЦ): 823807

Адрес для переписки: ovsyannikov.mail@gmail.com

ДОРОФЕЕВ Егор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 8323-4198

AuthorID (РИНЦ): 1147663

AuthorID (SCOPUS): 57208906779

ResearcherID: V-9114-2018

Адрес для переписки: shevdm@mail.ru

ДУБРОВСКИЙ Евгений Николаевич, ведущий инженер-технолог Чаяндинского нефтегазопромыслового управления ООО «Газпром добыча Ноябрьск», г. Ноябрьск.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 08.09.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 25.11.2025.

OVSYANNIKOV Andrey Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Leading Process Engineer, East Siberian Oil and Gas Production Directorate of LLC "Gazprom Dobycha Noyabrsk", Noyabrsk.

SPIN-code: 6210-7357

AuthorID (RSCI): 823807

Correspondence address: ovsyannikov.mail@gmail.com

DOROFEEV Egor Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8323-4198

AuthorID (RSCI): 1147663

AuthorID (SCOPUS): 57208906779

ResearcherID: V-9114-2018

Correspondence address: shevdm@mail.ru

DUBROVSKIY Evgeniy Nikolayevich, Leading Process Engineer, Chayandinskoye Oil and Gas Production Directorate of LLC "Gazprom Dobycha Noyabrsk", Noyabrsk.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 08.09.2025; approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 25.11.2025.