

**К.С. Галягин, А.С. Ипанов, М.А. Ошивалов, Ю.А. Селянинов**

Пермский государственный технический университет

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА МНОГОФАЗНОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ ПРОДУКЦИИ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН**

Использование аппаратов со струйными течениями (струйных насосов) позволяет создавать технологические установки, имеющие ряд преимуществ, обусловленных их предельной простотой и компактностью, отсутствием движущихся частей, высокой надежностью работы, а также возможностью проведения на них одновременно нескольких технологических процессов. Указанные преимущества открывают широкие перспективы создания нового типа многофункциональных малогабаритных устройств для технологических систем нефтегазодобывающей и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности.

В настоящее время струйные насосы (инжекторы) нашли применение в составе дожимных насосных станций (ДНС) для перекачки продукции нефтедобывающих скважин с одновременной утилизацией попутного газа и транспортированием газожидкостной смеси (ГЖС) по единому трубопроводу. Проектирование установок требует решения ряда конструкторских, технологических и оптимизационных задач с целью обеспечения максимальной эффективности работы устройств. Необходимо рассчитывать термогазодинамические процессы, происходящие в различных типах струйных течений: свободно истекающих, эжекционных, кавитационных, пульсационных, вихревых, а также анализировать компонентный состав, скорости, температуры, давления и другие значения термодинамических и физических параметров смеси.

Существующие методики расчета струйных насосов дают возможность лишь приближенно оценить их интегральные ха-

рактические и не позволяют исследовать гидродинамику течения в условиях перекачки ГЖС. Детальное описание исследуемых физических явлений приводит к сложной математической модели теплообмена, реализация которой возможна лишь с использованием современных численных пакетов программ. Одним из наиболее эффективных для решения подобных задач является программный продукт STAR-CD компании CD-ADAPCO. Пакет ориентирован на решение задач механики жидкости и газа для многокомпонентных и многофазных сред с учетом их возможного химического взаимодействия.

Приведенные в данной статье численные расчеты выполнены по заказу ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» в рамках научно-исследовательской работы по проектированию автоматизированной многофазной гидроструйной установки (УГС) на основе эжектора с изменяемыми геометрическими параметрами. Основные цели исследования – обеспечение устойчивой работы установки в различных режимах перекачки ГЖС и снижение энергозатрат за счет рационального выбора геометрических и расходных характеристик проточного тракта.

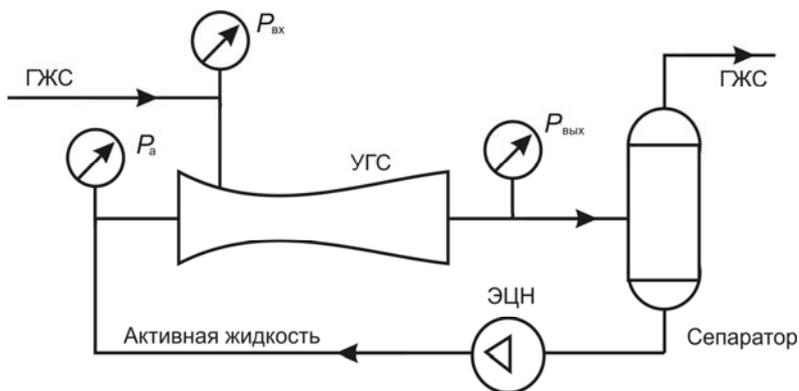


Рис. 1. Технологическая схема ДНС

Фрагмент технологической схемы дожимной насосной станции, в состав которой входит УГС, приведен на рис. 1. Схема включает собственно гидроструйную установку, шурфовой электроцентробежный насос (ЭЦН) с регулируемым электроприводом для подачи в УГС рабочей жидкости и сепаратор, обеспечивающий отделение ГЖС от рабочей жидкости. Нефтегазовая смесь (пассивная среда) подается в УГС при низком давлении  $P_{вх}$ , эжектируется рабочей жидкостью (активной средой) с повышением давления до  $P_{вых}$  и после сепарации поступает в транспортный трубопровод. Шурфовой насос повышает давление активной жидкости до  $P_a$ .

Отличие проектируемой установки от традиционных струйных насосов заключается в схеме подачи активной и пассивной сред. В УГС используется кольцевое активное сопло с изменяемыми геометрическими параметрами. На рис. 2 выделена рабочая часть проточного тракта УГС, включающая кольцевое сопло, каналы для подачи активной и пассивной сред в камеру смешения. Активная жидкость подается через кольцевой канал 1, образованный газовой трубкой 3 и подвижным сопловым наконечником 5. Площадь проходного сечения сопла регулируется смещением соплового наконечника под действием пружины 6 в зависимости от активного давления, создаваемого шурфовым ЭЦН. С увеличением давления активной жидкости пружина сжимается и сопловой наконечник смещается вправо, что приводит к увеличению сечения сопла и расхода рабочей жидкости. На рисунке сопловой наконечник изображен в крайнем положении, соответствующем минимальному сечению. Газ поступает по неподвижной внутренней трубке 3, жидкость – по внешнему каналу 2. Причем такое распределение ГЖС по каналам достаточно условно, так как в рабочих режимах УГС по обоим каналам может подаваться газ, жидкость или ГЖС.

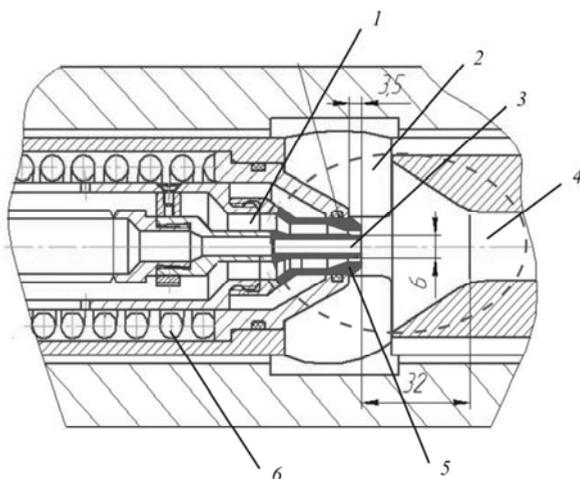


Рис. 2. Конструкция соплового узла УГС:  
 1 – канал подачи активной жидкости; 2 – канал подачи пассивной жидкости; 3 – канал подачи пассивного газа; 4 – камера смешения; 5 – подвижный сопловой наконечник; 6 – пружина

Расчетная схема задачи, используемая при моделировании течений в проточной части УГС, приведена на рис. 3. Она включает кольцевое сопло, каналы подачи пассивной и активной сред, камеру смешения и диффузор.



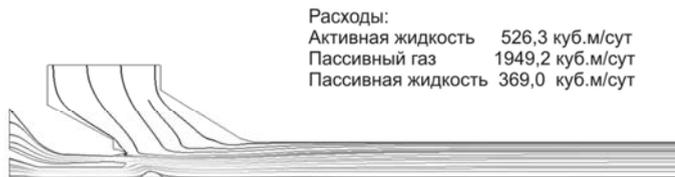
Рис. 3. Расчетная схема задачи

Поставленная задача реализована в рамках инженерного приложения CCM+ пакета STAR-CD (лицензия № 4901-10). Расчеты проводятся на основе прямого численного моделирова-

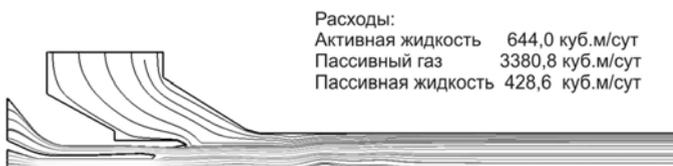
ния гидродинамики и теплообмена в реальной конструкции проточного тракта установки. Течение ГЖС в пределах расчетной области рассматривается как турбулентное, газовая фаза подчиняется законам идеального газа. Для оценки достоверности получаемых численных решений были проведены калибровочные расчеты. Сопоставление результатов с данными натурных испытаний УГС, проведенных на стенде ЗАО «НОВОМЕТ-Пермь» (активная жидкость – вода, пассивные среды – вода и воздух), убедительно свидетельствует об адекватности используемой компьютерной модели.

При расчетах в качестве граничных условий задавались значения давлений сред на входе в УГС и газожидкостной смеси на выходе из диффузора. Давление активной жидкости на входе в сопло варьировалось в соответствии с напорной характеристикой шурфового насоса при его работе на разных частотах регулирования. При решении задачи определялись поля скоростей, давлений, температур, а также расходы активной жидкости и компонентов пассивной среды. Проведено параметрическое исследование режимов работы УГС при варьировании профиля проходного сечения кольцевого канала подачи активной жидкости, геометрии камеры смешения и взаимной ориентации камеры смешения и активного сопла.

В качестве иллюстрации на рис. 4 представлены результаты расчета течений для различных режимов работы УГС при следующих исходных данных:  $P_a = 100 \text{ кг/см}^2$ ,  $P_{вх} = 8 \text{ кг/см}^2$ ,  $P_{вых} = 20 \text{ кг/см}^2$ , диаметр камеры смешения 19 мм. По внутреннему каналу подается пассивный газ, а по наружному – жидкость. На рис. 4, *а*, *б*, *в* изображены траектории течения ГЖС в зоне инжекции и на входе в камеру смешения, а также указаны расчетные расходы активной жидкости и компонентов пассивной среды.



*a*



*б*



*в*

Рис. 4. Траектории течения ГЖС

Рис. 4, *a* и рис. 4, *в* соответствуют режиму, когда сопловой наконечник находится в крайнем левом по схеме (см. рис. 2) положении (симметричное сопло), а площадь проходного сечения активного сопла минимальна. В расчетном варианте на рис. 4, *a* установка обеспечивает перекачку ГЖС в номинальном режиме работы шурфового насоса. При увеличении давления  $P_{вх}$  на вхо-

де пассивной среды шурфовой насос по заданному алгоритму поднимает давление  $P_a$  и сопловой наконечник смещается вправо. На рис. 4, б сопловой наконечник находится в крайнем правом положении, а площадь сечения кольцевого сопла максимальна. В этом режиме возрастает объем перекачиваемой ГЖС, что приводит к снижению давления  $P_{вх}$ . Расчетами показано, что расходные характеристики проточного тракта УГС чрезвычайно чувствительны к изменению его геометрических параметров. Так, уменьшение диаметра камеры смешения всего на 1 мм существенно изменяет картину течения (см. рис. 4, в). На входе в камеру образуется устойчивый вихрь, который частично «запирает» канал пассивной жидкости, в результате чего ее расход уменьшается более чем в два раза. В то же время уменьшение притока жидкости через внешний канал способствует более интенсивной инжекции пассивного газа.

В реальных промышленных условиях перекачки ГЖС давление смеси  $P_{вых}$  на выходе из диффузора изменяется в зависимости от различных факторов и может достигать больших значений. С целью проверки работоспособности инжектора на этих режимах были проведены расчеты при различных давлениях на выходе. На рис. 5 изображены кривые расходов пассивных сред, полученные при следующих условиях: шурфовой насос обеспечивает один и тот же перепад давлений, давление пассивной ГЖС неизменно и составляет  $8 \text{ кг/см}^2$ , работает симметричное активное сопло (как наиболее проблемный вариант). Как и следовало ожидать, с повышением давления на срезе диффузора расходы газа и жидкости уменьшаются, причем наиболее быстро падает расход жидкости. При давлении смеси на выходе порядка 30 бар инжектор еще работоспособен. Очевидно, это значение и является предельно достижимым в выбранных условиях. Дальнейшее повышение давления приводит к расчетной неустойчивости течения вплоть до образования возвратных течений в диффузоре и во входном сечении пассивной жидкости.

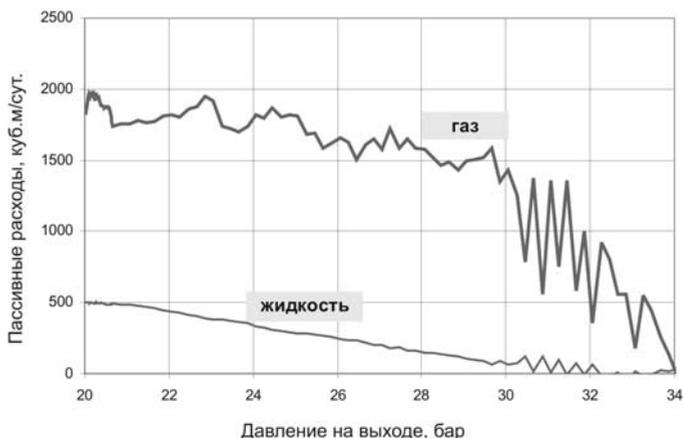


Рис. 5. Зависимость расходов пассивных сред от давления  $P_{\text{вых}}$

На основании результатов численного моделирования выполнена оптимизация параметров проточного тракта гидроструйной установки, проведена оценка эффективности ее работы в различных условиях. Определены диапазон и алгоритм автоматического регулирования площади проходного сечения активного кольцевого сопла, обеспечивающие работу УГС в области максимальных КПД шурфового насоса.

**К.С. Галягин, М.А. Ошивалов, Ю.А. Селянинов, Е.И. Вахрамеев**

Пермский государственный технический университет

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПАРОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ**

Процесс парофазного осаждения примесей по технологии MCVD является одним из ключевых звеньев в технологической цепи производства высококачественных кварцевых световодов. На этапе подготовки преформ для вытяжки световолокна на внутренней поверхности опорной кварцевой трубки создаются условия для осаждения оксидов кремния и легирующих элементов (Ge, P), доставляемых в зону реакции в виде летучих хлоридных соединений.