

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕРАВНОВЕСНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

<sup>1</sup> А. Н. Гурбанов, <sup>2</sup> Ф. Г. Исмаилов

<sup>1</sup> НИПИнефтегаз, г. Баку ул. Г. Зардаби 88,  
e-mail: q a b d u l a q a @ m a i l . r u

<sup>2</sup> ПО Азнефть, г. Баку, ул. Ага Нейматулла 21

*На газовых промыслах организуется комплексная подготовка газа до удаленного транспортирования, в схеме которой основную роль играют массообменные аппараты.*

*Разработана модель утворення та руху гідратів у газопроводах і масообмінних апаратах абсорбційного осушування природного газу. Розроблено модель утворення гідратів під час руху каналами сирового газу, що заснована на рівняннях гідродинаміки і теплообміну в осесиметричній постановці. Представлено математичну модель нерівноважної течії природного газу з конденсованою фазою в криволінійних каналах. Наведено технологічні та конструкторські шляхи поліпшення роботи АВО (апаратів повітряного охолодження) сирового газу.*

Ключові слова: масообмін, гідратоутворення, блоки АВО, математична модель, труби.

*На газовых промыслах организуется комплексная подготовка газа к дальнему транспорту, в схеме которой основную роль играют массообменные аппараты.*

*Разработаны модели образования и движения гидратов в газопроводах и массообменных аппаратах абсорбционной осушки природного газа. Разработана модель образования гидратов при течении в каналах сырого газа, основанная на уравнениях гидродинамики и теплообмена в осесимметричной постановке. Представлена математическая модель неравновесного течения природного газа с конденсированной фазой в криволинейных каналах. Приведены технологические и конструкторские пути улучшения работы АВО (аппаратах воздушного охлаждения) сырого газа.*

Ключевые слова: массообмен, гидратообразование, блоки АВО, математическая модель, трубы.

*The article deals with complex preparation of gas transportation for long distances. Mass transfer apparatus play the key role in the scheme.*

*The models of gas hydrates formation and motion in gas pipelines and mass transfer apparatus of absorptive natural gas dehydration were worked out. The model of gas hydrates formation during the channel flow of crude gas was also developed. The scheme of the model is based on the hydrodynamics and heat exchange equations in axisymmetric position. The mathematical model of a nonequilibrium flow of natural gas with the condensed phase in curved channels was presented. Besides technological and engineering ways to improve the work of crude gas air cooling devices were elaborated.*

Keywords: mass transfer, hydrates formation, blocks of air cooling devices, mathematical model, pipelines

Развитие газодобывающей промышленности связано с эксплуатацией и сооружением крупных промыслов и строительством мощных магистральных газопроводов. На газовых промыслах организуется комплексная подготовка газа к дальнему транспорту, в схеме которой основную роль играют массообменные аппараты. Усилия специалистов направлены на разработку технических решений, позволяющих интенсифицировать процесс массообмена, увеличить производительность и уменьшить вынос абсорбента из аппаратов [1].

Осушка газа при его подготовке в промышленных условиях направлена на предотвращение гидратообразования. Образование газовых гидратов обусловлено термобарическими условиями в трубопроводах и аппаратах, наличием свободной капельной влаги, образованием центров кристаллизации. Разработка современных технологических процессов переработки природного углеводородного сырья и оптимальная эксплуатация действующих производств невозможна без применения моделирующих программ, позволяющих без значительных ма-

териальных и временных затрат производить исследования этих процессов. Такие модельные исследования имеют огромное значение не только для проектирования, но для функционирования существующих производств, так как позволяет учесть влияние внешних факторов (изменение состава сырья, изменение требований к конечным и промежуточным продуктам и т.д.) на показатели действующих производств [2]. Подготовки и переработки природного углеводородного сырья, экспериментальное и численное моделирование физических процессов подготовки промыслового газа являются актуальными и важными задачами обеспечения требуемых потребительских свойств природного газа. Разработке и научном обосновании математических моделей термогазодинамических процессов современных технологий подготовки природного газа в промышленных условиях, обеспечивающих товарные показатели газа при эксплуатации действующих производств.

Для реализации поставленной цели необходимо решить и разработать числовую модель образования гидратов в аппаратах и трубопро-

водах, провести численні розрахунки неравновесного течения природного газу з конденсованою фазою в каналах складної форми [3].

На газових і газоконденсатних местородженнях знайшли широке застосування АВО. Блоки АВО складаються з 10-16 апаратів. В кожному апараті існують три продольні теплообмінні секції з шестью рядами горизонтальних оребрених труб. В кожному ряду тридцять (двадцять дев'ять) труб, розташованих в шахматному порядку. Восходящий потік холодного повітря через ці ряди труб створюється двома вентиляторними, встановленими на фундаменті під трубчастими секціями.

АВО в безгидратному режимі роботи ефективно охолоджують осушений природний газ, а також сирий газ при позитивних температурах оточуючого повітря. Однак в зимових умовах в процесі охолодження сирого газу після проходження першої ступені з'являється ряд проблем. В нижньому ряду труб в результаті локального переохолодження газу виникають умови для гідратоутворення. На внутрішній стінці теплообмінних труб утворюються гідрати і лід, в результаті чого окремі труби руйнуються.

Для запобігання процесам гідратоутворення при охолодженні сирого газу в трубах АВО на практиці потрібно підтримувати достатньо високу середню температуру газу на виході з апаратів (іноді до 18-20 °С), обмежуючи тем самым не тільки потенціальні можливості АВО, але і знижуючи якість газу, підготовлюваного до транспорту. Особливо гостро стоїть питання якості підготовки газу за показником «температура точки роси» за вологістю в умовах падаючого пластового тиску [4].

Основною метою АВО, охолоджуючого сирого газу є отримання мінімальної температури газу, подаваного на осушку при підготовці його до дальнього транспорту.

Крім ефекту відкладення на стінках труб, тверді частинки можуть виконувати абразивне вплив на конструктивні елементи запірної і вимірної газової апаратури. Конденсована фаза при течії природного газу крім гідратів може містити інші тверді домішки (окислювачі, пісок і т.д.) Оцінку такого впливу можна провести шляхом розв'язання рівнянь руху двохфазної суміші в елементах газопроводу.

Рівняння для дисперсної фази записувалися в криволинійній системі координат.

$$\begin{aligned} & \left( J r^\gamma n u_s \right)_\xi + \left( J r^\gamma n v_s \right)_\eta = 0 ; \\ & \left( J r^\gamma \rho_s u_s u_s \right)_\xi + \left( J r^\gamma \rho_s v_s u_s \right)_\eta + \\ & + r^\gamma \rho_s v_s u_s J_\eta - r^\gamma \rho_s v_s v_s J_\xi = J^2 r^\gamma Q_2 ; \\ & \left( J r^\gamma \rho_s u_s v_s \right)_\xi + \left( J r^\gamma \rho_s v_s v_s \right)_\eta + \\ & + r^\gamma \rho_s v_s u_s J_\xi - r^\gamma \rho_s v_s v_s J_\eta = J^2 r^\gamma Q_3 ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left( J r^\gamma \rho_s u_s E_s \right)_\xi + \left( J r^\gamma \rho_s u_s E_s \right)_\eta = J^2 r^\gamma Q_1 ; \\ & \left( J r^\gamma n_s u_s \right)_\xi + \left( J r^\gamma n_s v_s \right)_\eta = 0 , \end{aligned}$$

де індекс  $s$  належить дисперсній фазі;

$C_s, \rho_l$  – теплоємність і густина речовини крапель;

$n$  – кількість конденсованих частинок в одиниці об'єму;

$B_u, B_T$  – коефіцієнти опору і теплообміну між фазами, визначаються по формулам:

$$B_u = \frac{9\mu}{2\rho_l r_s^2} f ;$$

$$f = 1 + 0,25\sqrt{\text{Re}} + 0,0117 \text{Re} ;$$

$$\text{Re} = \frac{|v - v_s| r_s \rho}{\mu} ;$$

$$B_T = \frac{B_u \text{Nu} c_p}{3 \text{Pr} c_s f} ;$$

$$\text{Nu} = 2 + 0,459 \text{Re}^{0,55} \text{Pr}^{0,33} .$$

Для розв'язання рівнянь, описуючих рух частинок, побудована різниця схема, що враховує напрямлення течії. Для розв'язання різницевих рівнянь застосовується двохрівневий ітеративний процес. В якості початкового наближення для швидкостей частинок беруться швидкості газу. Чисельний метод дозволяє розраховувати поля швидкостей газової і дисперсної фаз, траєкторії руху частинок, масовий потік осаджуються на стінки частинок.

Рух газової фази розраховувався за числом Рейнольдса 50000. Векторне поле швидкостей наведено на рис. 1.

Як випливає з результатів розрахунків, поле течії не є симетричним. Спочатку течія підтягується до стінки малого радіуса, а потім в протилежну сторону. В результаті відхилення течії від центру утворюються вихрові течії, як це видно на рис. 1. Профіль швидкості має характерний турбулентний профіль.

Рух частинок розраховувався для еквівалентних діаметрів частинок від 10 мкм до 500 мкм. Траєкторії частинок представлені на рис. 2. Частички малого розміру (10 мкм) відстають від ліній потоку газової фази і зі стінками практично не взаємодіють. Більш великі частинки діаметром 100 мкм зіткнулися зі стінкою труби після вигину.

Великі частинки (300 і 500 мкм) мають більш прямі траєкторії на ділянці вигину труби і зіткнулися зі стінкою з високою інтенсивністю. Низькошвидкісні частинки в 300 мкм можуть захоплюватися вихровими течіями газу і перебувати в них деякий час. Великі частинки діаметром 500 мкм майже всі проникають крізь вихор. Тільки частинки з пристіночної області з дуже малими швидкостями виконують в вихорі зворотний рух.

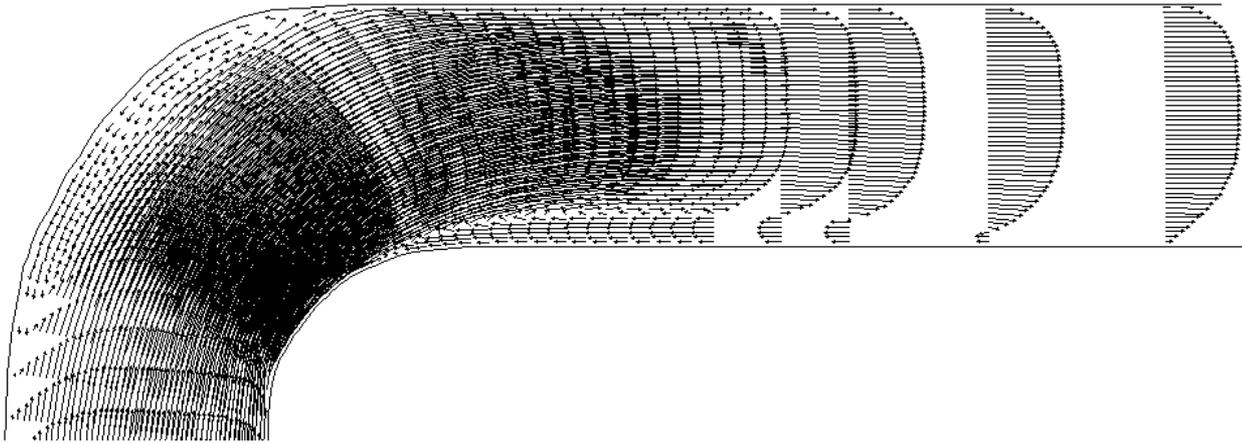


Рисунок 1 – Поле скоростей на криволинейном участке трубы

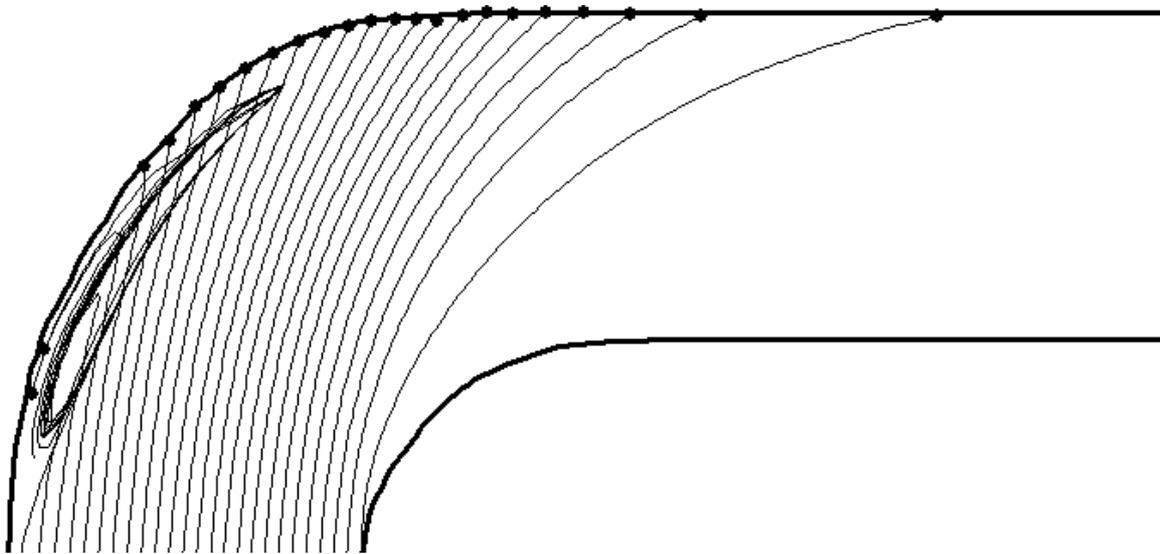


Рисунок 2 – Траектории частиц диаметром 300 мкм

В результате решения задачи о движении двухфазной смеси частиц и газа по криволинейному участку трубы рассчитаны массовые потоки выпадающих на стенку частиц различных размеров.

На рис. 3 показаны распределения массовых потоков осаждающихся частиц  $G$  разных размеров. Координата  $S$  отсчитывается по стенке трубы. Массовый поток  $G$  отнесен к массовому расходу частиц на прямолинейном участке трубы ( $\rho_s W_s$ ). Эти данные могут быть использованы при оценке механического воздействия частиц на стенки трубопроводов при различной степени осушки природного газа.

Для исследования фактического состояния вопроса эксплуатации АВО на НГДУ "Гум адасы" был изучен опыт работы аппаратов воздушного охлаждения. В настоящей работе основное внимание направлено на возможность снижения температуры охлаждаемого природного газа перед его осушкой и подготовкой к транспорту. Для обеспечения антигидратных условий эксплуатации АВО в зимний период рассмотрим использование следующих технических решений:

1) распределение потока газа с увеличением расхода от верхнего к нижнему ряду теплообменных трубок при сохранении среднего расхода по секции аппарата;

2) подача ингибитора в зону наиболее вероятного появления гидратов (нижний ряд труб);

3) комбинированное техническое решение из приведенных выше двух направлений.

Рассмотрим первое техническое решение. Шесть рядов по вертикали теплообменных труб в каждой секции аппарата соединены распределительной и сборной камерами, которые можно рассматривать соответственно как коллекторы для подачи и отбора газа в процессе его охлаждения. Минимизация условий гидратообразования в газе требует максимального расхода потока газа в нижнем ряду при постоянном среднем потоке через секцию. Этому условию будет соответствовать схема подключения газа при перекрестном движении теплоносителей. Схема подсоединения охлаждаемого газа от существующей схемы отличается тем, что в распределительную камеру секции аппарата газ подается не снизу, а сверху. Предлагаемая схема распределения потоков полезна не только с точки зрения возможности тор-

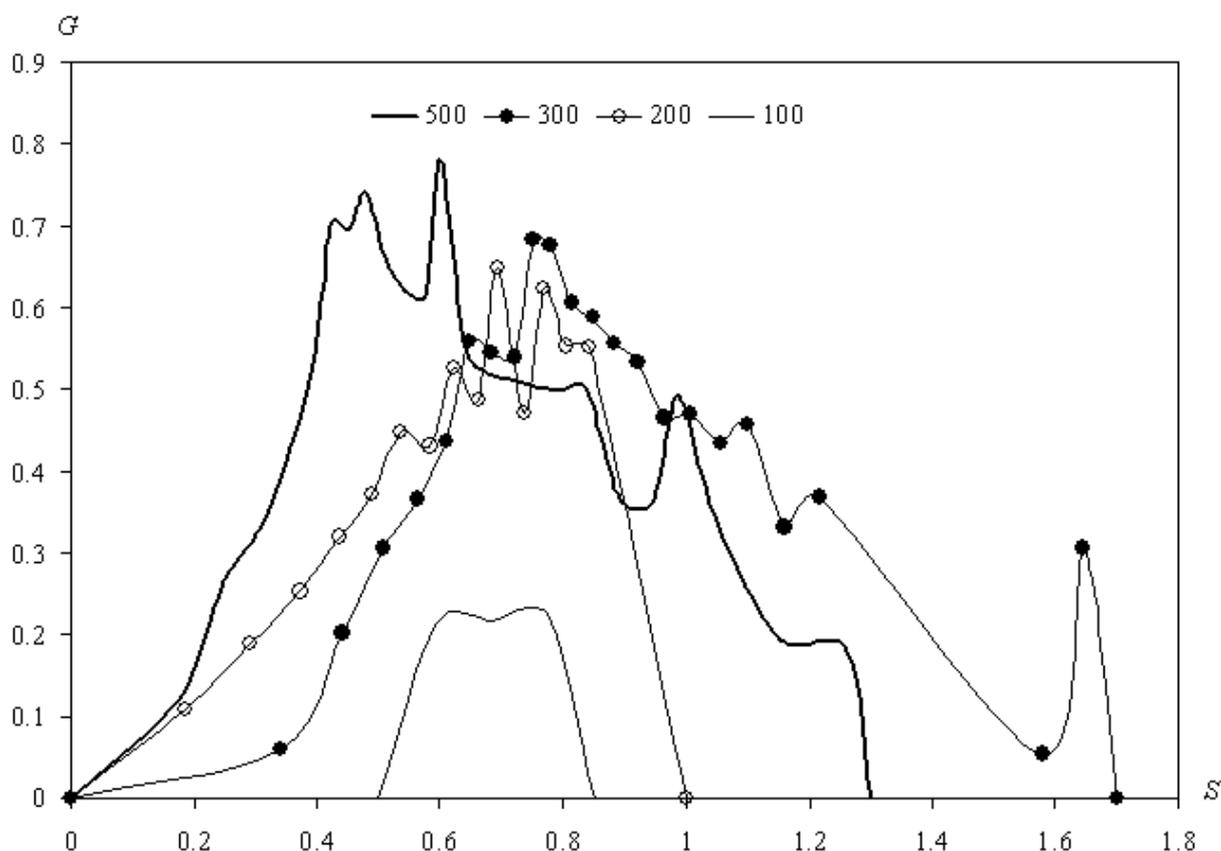


Рисунок 3 – Распределение массовых потоков, осаждающихся на стенку трубы частиц

можения процесса гидратообразования, но и способствует ускоренной эвакуации зародышей гидратов из нижних рядов труб за счет наибольшей скорости газового потока, определяемой предлагаемой схемой. Однако результаты испытаний показали незначительное увеличение эффективности процесса. В данном случае следует организовать циркуляцию абсорбента через работающий аппарат, подавая его в распределительную камеру (коллектор) каждой секции (в аппарате их три) и, отбирая из собирающей камеры (коллектора), накапливать в специальной буферной емкости, откуда забирать насосом и подавать на рециркуляцию. При повышении уровня абсорбента в распределительной камере трубного пучка до сечения труб нижнего ряда метанол захватывается потоком газа и транспортируется по всем теплообменным трубам нижнего ряда, разрушая имеющиеся гидраты и не позволяя появляться новым. Для накопления абсорбента в распределительной камере необходимо, чтобы в отверстие для подачи газа был вставлен патрубок, и газ подавался бы в верхнюю зону распределительной камеры.

Положительные стороны предлагаемого решения: разрушаются образовавшиеся гидраты и лед не только в нижних теплообменных трубах, но и в собирающих и, что особенно важно в распределительных камерах секций АВО; решение способствует эвакуации воды, жидких углеводородов, мехпримесей и т.д. из нижних теплообменных труб, не позволяя развиваться зародышам гидратов и льда. Абсор-

бент в необходимом количестве подается непосредственно в зону гидратообразования; создается дополнительное термическое сопротивление теплопередаче от фронтального воздействия потока холодного воздуха; процесс может быть организован как на постоянной, так и на эпизодической (временной) основе; минимальные потери абсорбента с газом.

Подача газа в верхнюю зону рас пределительной камеры секции АВО без больших материальных затрат приводит к условиям схемы подкочления газа с увеличением расхода газа по нижнему ряду теплообменных труб.

Более надежно метанол подавать в теплообменные трубы с помощью фитилей, одним концом помещенных в теплообменные трубы на 100...150 мм, а другим – в находящийся в распределительной камере абсорбент. Поток газа с фитиля будет увлекать с собой абсорбент через всю трубу.

Другая возможность принудительно подать абсорбент – установить в торце теплообменных труб вспомогательные Г-образные трубы внутренним диаметром 2...3 мм. Располагать их следует аналогично фитилям. Абсорбент за счет эжекции газом будет подаваться из распределительной камеры в теплообменные трубы. Эжекционную часть вспомогательной трубы целесообразно расположить у стенки в нижней части теплообменной трубы, чтобы подаваемое количество абсорбента не было излишним.

**Вывод**

Научно обоснованы технологические схемы и характеристики процессов подготовки природного газа к дальнему транспорту. Разработаны модели образования и движения гидратов в газопроводах и массообменных аппаратах абсорбционной осушки природного газа.

Разработана модель образования гидратов при течении в каналах сырого газа, основанная на уравнениях гидродинамики и теплообмена в осесимметричной постановке.

Разработана методика оценки выпадения конденсата в газовой фазе при движении природного газа, использующая результаты совместного численного решения уравнений для газовой и конденсированной фаз в двумерной постановке. В технологическом плане выявлены перспективные решения подачи абсорбента в нижний ряд теплообменных трубок секции и рециркуляция его через АВО.

**Литература**

1 Истомин В. А. Мониторинг термобарических параметров работы газосборной системы УКПГ сеноманской залежи в период падающей добычи / В. А.Истомин и др. // Приложение к журналу «Наука и техника в газовой промышленности». – 2006. – № 3. – С. 52-60.

2 Квон В.Г. Программное обеспечение для расчета расхода метанола в шлейфах и установках комплексной подготовки газа северных месторождений / В.Г.Квон, В.А.Истомин // Особенности освоения газовых скважин в сложных геокриологических". – М.: изд-во ВНИИГаз, 1987. – С. 111-119.

3 Гурбанов А.Н. Разработка оптимального состава полипропиленгликоля и исследование его в качестве осушителя природного газа / А.Н.Гурбанов // Укр.НТЕ, Експрес-Новини: Наука. Техника. Виробництво. – 2008. – № 2. – С.58-59.

4 Брагинский О.Б. Нефтегазовый комплекс мира / О.Б.Брагинский. – М: Центр Лит НефтеГаз, 2006. – 640 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
22.01.13*

*Рекомендована до друку  
професором Кондратом Р.М.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Алиевым М.  
(НИПИнефтегаз, г. Баку)*