

6. Сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ. Составители: Крец В.Г., Шадрина А.В., Антропова Н.А. Учебное пособие. - Томск: Изд. ТПУ, 2012. – 386 с.
7. Лапшин, А. А. и др. Конструирование и расчёт вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления: учебное пособие / Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – Н. Новгород, ННГАСУ, 2009. – 122 с.
8. Николаев Н.В., Иванов В.А., Новоселов В.В. Стальные вертикальные резервуары низкого давления для нефти и нефтепродуктов: учебник для вузов. – Изд-во ООО "ЦентрЛитНефтеГаз", 2007. – 492 с.
9. Самогин Ю.Н., Хроматов В.Е., Чирков В.П. Метод конечных элементов в задачах сопротивления материалов / Под ред. В.П. Чиркова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 200 с. – ISBN 978-5-9221-1380-9.
10. Светашков А.А. Элементы теории упругости: учебное пособие / А.А. Светашков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 164 с.
11. Светашков А.А., Куприянов Н.А., Манабаев К.К. Эффективные по времени вязкоупругие модули типа Хашина-Штрикмана // Физическая мезомеханика. — 2013. — Т. 16, № 2. — С. 33-39.
12. Светашков А.А., Куприянов Н.А., Манабаев К.К. Модификации эффективных модулей типа Хашина-Штрикмана для двухкомпонентного изотропного композита // Физическая мезомеханика / Российская академия наук (РАН), Сибирское отделение (СО), Институт физики прочности и материаловедения (ИФПМ). — 2015. — Т. 18, № 6. — С. 57-65.

## **АНТИПОМПАЖНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРАХ**

**М.В. Попов**

Научный руководитель - профессор Л.А. Саруев

*Национальный исследовательский Томский Политехнический университет, г. Томск, Россия*

Помпаж – вредное явление, которое может сформироваться в лопастных нагнетателях, состоящее в том, что непрерывный поток подаваемого газа нарушается и становится нерегулярным или пульсирующим (в том числе и знакопеременным).

Помпаж в разных условиях проявляется с различной интенсивностью. От едва заметных изменений подачи, производительности и мощности до значительных резких изменений, опасных для нагнетательной установки, трубопроводной системы и контактирующих с ними установок и агрегатов. В случае формирования автоколебательного процесса усилить последствия помпажа могут резонансные явления. Известны случаи разрушения машин и трубопроводов.

Таким образом, под помпажом понимается неустойчивый режим работы нагнетателя, который характеризуется резкими колебаниями давления (напора) и расхода перекачиваемой среды [1].

Помпажу подвержены компрессоры кинетического сжатия (осевые и центробежные). При помпажном режиме резко ухудшается газодинамика проточной части компрессора, в результате чего он не сможет создавать требуемый напор, но при этом, давление за ним на некоторое время останется высоким. В результате может произойти обратный проброс газа. Давление за компрессором уменьшится, он снова будет развивать напор, но при отсутствии расхода напор резко упадет, и ситуация повторится. При помпаже вся конструкция испытывает большие динамические нагрузки, которые могут привести к ее разрушению.

Для предотвращения возникновения помпажа предусматривается применение специальных противопомпажных устройств. Например, клапанов, настроенных на перепуск газа во всасывающий патрубок компрессора при уменьшении производительности до границы помпажа. При определенных условиях возможен выпуск перемещаемого газа в атмосферу. Контроль достижения границы помпажа осуществляется по расходу газа в трубопроводе или по уровню давления.

В общем случае газодинамическая устойчивость работы нагнетателя может быть оценена по положению его рабочей точки относительно границы помпажа – линии, представляющей совокупность точек начала автоколебательных процессов на характеристиках, представленных для различных чисел оборотов компрессора. При нахождении рабочей точки левее границы помпажа (при низкой производительности), компрессор входит в помпаж. Правее линии границы помпажа на определенном расстоянии, характеризующем помпажный запас, находится линия регулирования – линия, относительно которой рабочая точка не должна уходить влево.

Задачей антипомпажной защиты и регулирования является поддержание помпажного запаса на заданном уровне, обнаружение помпажного состояния и вывод компрессора из зоны помпажа. Поддержание помпажного запаса достигается за счет оперативного частичного открытия антипомпажного клапана (АПК) при достижении рабочей точкой линии регулирования или же при быстром приближении к ней. Причем если рабочая точка достигает линии регулирования, то она удерживается на ней. Степень открытия антипомпажного клапана (АПК) определяется контуром управления антипомпажного регулирования [2].

Для устранения или предупреждения помпажа применяется частичное или полное открытие АПК, после чего осуществляется плавное закрытие регулирующего органа, и рабочая точка нагнетателя выводится к линии регулирования.

Таким образом, сущность антипомпажного регулирования заключается в управлении и контроле положением рабочей точки газодинамической системы по отношению к линии границы помпажа. Следовательно, необходимо рассмотреть существующие способы управления работой нагнетателей.

Управление – совокупность действий, выбранных на основании определенной информации и направленных на поддержание на заданном уровне или изменение в соответствии с целевой функцией параметров работы установки или системы в целом. Управляющая совокупность действий при изменении

режима работы газодинамической системы может быть определена на основании анализа ее характеристик. Например, при поддержании режима функционирования газодинамической системы (а именно: давления и расхода газа) в набор совокупных действий по поддержанию этих параметров на заданном уровне входят возможные воздействия и на характеристику сети и (или) нагнетателя. Управление может осуществляться в автоматическом и ручном режимах.

Термин «регулирование» применяется, если речь идет о поддержании на заданном уровне или изменении по заранее установленному закону физической величины, являющейся параметром работы установки. Автоматическое регулирование является составной частью автоматического управления. Регулирование того или иного параметра предполагает непрерывное измерение его величины, анализ соответствия ее заданному значению, формирование и реализацию регулирующего воздействия, которое прямо или косвенно приводит регулируемый параметр к «норме».

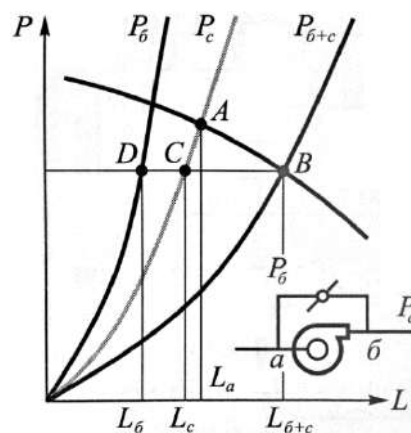
Управление работой системы или регулирование отдельных параметров установки предполагает реализацию воздействий без остановки системы или входящих в нее агрегатов. Изменить режим работы системы можно и путем замены, привода, передачи или даже нагнетателя. Эти действия можно назвать реконструкцией, адаптацией к новым условиям и т.п. Они реализуются при периодическом изменении рабочих параметров системы, при этом эксплуатация системы в новом режиме осуществляется значимый промежуток времени. Характерным примером этого являются сезонные изменения производительности систем кондиционирования воздуха.

Регулирование в системе нагнетатель – сеть требует обязательного учета особенностей каждого элемента данной системы. Характеристики нагнетателей отличаются некоторым разнообразием, что приводит к необходимости применения и различных регулирующих воздействий.

Набор способов воздействия на сеть путем изменения ее сопротивления ограничен и определяется только местом приложения регулирующего воздействия: регулирующий орган может быть расположен после нагнетателя, до нагнетателя или на обводной линии (байпасе). Следует отметить, что изменение сопротивления сети может осуществляться путем дросселирования ее на магистральных трубопроводах и ответвлениях от них. При ограниченном числе способов изменения сопротивления сети следует отметить достаточно большое разнообразие регулирующих органов, с помощью которых реализуется регулирующее воздействие: шиберы, поворотные заслонки, задвижки, краны, вентили и т.д.

Антипомпажное регулирование производительности производится перепуском газа из области нагнетания в область всасывания в рабочем режиме (байпасирование) и применяется при регулировании режима работы центробежных компрессоров и заключается в том, что параллельно основной сети подключается участок, сопротивление которого можно оценить путем наложения графических построений (рис 1). При закрытом регулирующем органе на байпасе режим совместной работы сети и нагнетательной установки определяется точкой А. Расход в сети равен  $L_a$ . При включении байпаса к сети параллельно подключается участок с характеристикой  $P_b$ . Суммарная характеристика «сеть+байпас» определяется по ранее рассмотренной методике и представлена линией  $P_{b+c}$ . Таким образом, при включении байпаса рабочая точка переходит в положение «В». Производительность нагнетателя возрастает до значения  $L_{b+c}$  при некотором снижении подачи в сеть до  $L_c$  ( $L_c < L_a$ ). Расход газа через байпас равен  $L_b$ . Анализ выполнен в предположении, что участки сети параллельные байпасу (участок а–б), имеют пренебрежимо малое сопротивление. При существенном сопротивлении участка а–б сеть следует рассматривать как последовательное соединение участка а–б и «остальных» участков сети. В этом случае байпас рассматривается как участок, параллельно подключенный к «остальным» трубопроводам, и нахождение общего сопротивления сети должно осуществляться по схеме [3]:

$$P_{c+b} = ((P_c - P_{a-b}) + P_b) + P_{a-b} \quad (1)$$



**Рис.1** Последствия применения байпаса

При возрастании производительности центробежных нагнетателей потребляемая мощность возрастает. Таким образом, применение байпасов для целей регулирования подачи среды в сеть приводит к дополнительным потерям мощности. Причем они больше, чем при применении дросселирования. Байпасирование является самым

простым по реализации способом и самым затратным по энергетическим показателям. При необходимости уменьшить подачу газа в нагнетающий трубопровод открывается перепускной регулирующий орган, соединяющий область нагнетания и область всасывания. Общая производительность нагнетателя при этом возрастает, а подача перемещаемого газа в сеть уменьшается.

Ввиду простоты реализации и возможности изменения производительности в широком диапазоне этот способ регулирования, к сожалению, находит применение. Применительно к компрессорам следует отметить, что при длительном открытии байпаса за счет поступления горячих газов из нагнетательной полости в область всасывания может существенно повыситься температура компрессора. Этот процесс характерен для всех видов нагнетателей, но при малых развиваемых давлениях меньше и его «температурный» эффект.

#### Литература

1. Ден Г.Н. Механика потока в центробежных компрессорах. – Л.: Машиностроение, 1973. – 272 с.
2. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах. – М.: Машиностроение, 1974. – 264с.
3. Старосельский С. Встроенная система защиты от помпажа и контроля производительности центробежных компрессоров. – Компрессорная техника и пневматика, 2013. №3. С. 15.

### ОЦЕНКА ПРОНИЦАЕМОСТИ УГЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КЕРНА МЕТОДАМИ СТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ЯМР- РЕЛАКСОМЕТРИИ

Л.А. Рыбалкин, М.И. Шумскайте

Научный руководитель - заведующий лабораторией С.В. Сердюков  
*Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Разработка угольных пластов шахтным способом сопряжена как с ведением горных работ по подготовке, выемке и транспортировке угля, так и с контролем, извлечением постоянного спутника угля – газа метана. Снижение содержания метана до безопасных концентраций обеспечивают за счет мероприятий по дегазации угольных пластов. Эффективным способом интенсификации дегазации углепородного массива является проведение гидроразрыва [1, 3] в интервалах дегазационных скважин на различной глубине с закреплением полученных трещин расклинивающими материалами [4]. Исследования углепородного массива [2], проводимые как из шахтного поля, так и лабораторные исследования ядерного материала, отобранного с различных горизонтов месторождения, позволяют получить данные о проницаемости угля, что в дальнейшем способствует разработке наиболее оптимальной и рентабельной схемы дегазации, планированию дополнительных мероприятий по интенсификации дегазации газоносных пластов.

В данной работе приведены результаты лабораторных исследований угольных ядер диаметром 45 мм и длиной 45 мм. Результаты, полученные при исследовании скорости осевой фильтрации газа в условиях различных перепадов давления в угле, сжимающих напряжений, были дополнены сериями исследований пористости образцов, наличия жидкой фазы в порах на ЯМР – релаксометре. Анализ полученных данных позволил сформировать более полное представление о фильтрационных характеристиках изученных образцов угля.

Для измерения газопроницаемости из проб угля были подготовлены 3 ядра диаметром 45 мм и длиной 90мм. Исследования проводились на специальной установке в режиме осевой фильтрации газа азота в условиях равномерного сжатия образца. В первой серии исследований давление сжатия составляло 10 бар, во второй 15 бар, в третьей – 20 бар. Для всех образцов было проведено по 4 измерения времени вытеснения фильтрующимся газом фиксированного объема жидкости между двумя оптическими датчиками в мерном сосуде. Далее определялось среднее значение времени фильтрации газа, которое впоследствии использовалось для расчета коэффициента абсолютной газопроницаемости угля в условиях стационарной фильтрации при линейном направлении потока газа. Результаты серий измерения газопроницаемости образца №2 представлены на рис.1.

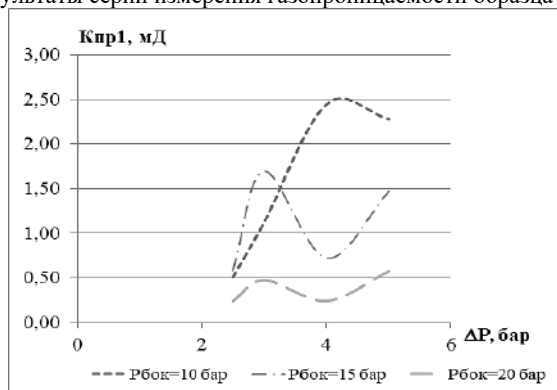


Рис. 1 Зависимость проницаемости образца при различных значениях перепада давления фильтрации и всестороннего сжатия