

# ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГИДРОДИНАМИКУ «КИПЯЩЕГО СЛОЯ» ПРОМЫШЛЕННОГО КАТАЛИЗАТОРА КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА

Халафова И.А.<sup>1</sup>, Юсиф-заде А.А.<sup>2</sup> Email: Khalafova639@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Халафова Ирада Ариф - кандидат технических наук, доцент;  
<sup>2</sup>Юсиф-заде Алина Алимовна - кандидат технических наук, доцент,  
кафедра нефтехимической технологии и промышленной экологии,  
Азербайджанский университет нефти и промышленности,  
г. Баку, Азербайджанская Республика

**Аннотация:** в работе изучалось влияние постоянного магнитного поля на гидродинамику псевдооживления промышленного катализатора Омникат-210П. Установлено, что воздействие магнитного поля ускоряет процесс перехода к псевдооживленному слою, который стабилен на все время своего существования, что способствует увеличению выхода целевых продуктов. Нами изучалось влияние постоянного магнитного поля на гидродинамику псевдооживленного промышленного катализатора Омникат-210П. Для исследования была взята фракция катализатора с размерами частиц 65-80 мкм и насыпной плотностью 0,65 г/см<sup>3</sup>. Как показали эксперименты, для частиц катализатора диаметром 65 мкм скорость начала псевдооживления  $W_{кр}$  составила  $3 \cdot 10^{-3}$  м/с, а  $W_y = 28 \cdot 10^{-3}$  м/с. Таким образом, зависимость между градиентом давления (потерей напора) каждого слоя материала и скоростью воздуха (инертного газа) становится выявленной и можно определить условия появления и исчезновения «кипящего» слоя.

**Ключевые слова:** катализатор, псевдооживленный слой, магнитное поле, критическая скорость, перепад давления, гидродинамика, потери давления, индуктивность, селективность, светлые нефтепродукты, бензиновая фракция, дизельная фракция, мазут, вакуумный газойль, цеолитсодержащий катализатор.

## THE INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD ON HYDRODYNAMICS OF “BOILING LAYER” OF CATALYTIC CRACKING'S INDUSTRIAL CATALYST

Khalafova I.A.<sup>1</sup>, Yusif-zadeh A.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Khalafova Irada Arif - Doctor of philosophy by technical sciences, Associate Professor;  
<sup>2</sup>Yusif-zadeh Alina Alimovna - Candidate of technical sciences, Associate Professor,  
DEPARTMENT PETROCHEMICAL TECHNOLOGY AND INDUSTRIAL ECOLOGY, CHEMICAL-TECHNOLOGICAL FACULTY,  
AZERBAIJAN STATE OIL AND INDUSTRIAL UNIVERSITY,  
BAKU, AZERBAIJAN REPUBLIC

**Abstract:** the effect of a constant magnetic field on the hydrodynamics of the fluidization of the industrial catalyst Omnicat-210P was studied. It is established that the action of the magnetic field accelerates the process of transition to a fluidized bed, which is stable for the entire time of its existence, which contributes to an increase in the yield of the target products. We studied the effect of a constant magnetic field on the hydrodynamics of a fluidized industrial catalyst Omnicat-210P. For the study, a catalyst fraction with a particle size of 65-80  $\mu\text{m}$  and a bulk density of 0.65 g / cm<sup>3</sup> was taken. As experiments have shown, for catalyst particles with a diameter of 65  $\mu\text{m}$ , the rate of the beginning of the fluidization  $W_{cr}$  was  $3 \cdot 10^{-3}$  m / s, and  $W_y = 28 \cdot 10^{-3}$  m / s. Thus, the relationship between the pressure gradient (loss of pressure) of each material layer and the air (inert gas) velocity becomes apparent and conditions for the appearance and disappearance of the "boiling" layer can be determined.

**Keywords:** accelerator, fluidized layer, magnetic field, critical speed, pressure drop, hydrodynamics, pressure losses, inductance, selectivity, light oil products, gasoline fraction, diesel fraction, fuel oil, vacuum gas oil, zeolite-containing catalyst.

УДК.665.54.44.537

Базовым процессом для получения автомобильных бензинов является процесс каталитического крекинга, интенсификация которого ведется в направлении усовершенствования технологии процесса, разработки новых высокоактивных и высокоселективных катализаторов, а также физическим воздействием, например, магнитного поля на сырье и на катализатор.

Исследования проводились на установке, представленной на рис. 1.

Магнитное поле создавалось обычным соленоидом с импульсом индукционного поля 0,25-0,40 Тл. Измерения проводились при комнатной температуре. В качестве псевдооживленного агента использовали воздух, подаваемый через компрессор 6 в нижний сток реактора 1.

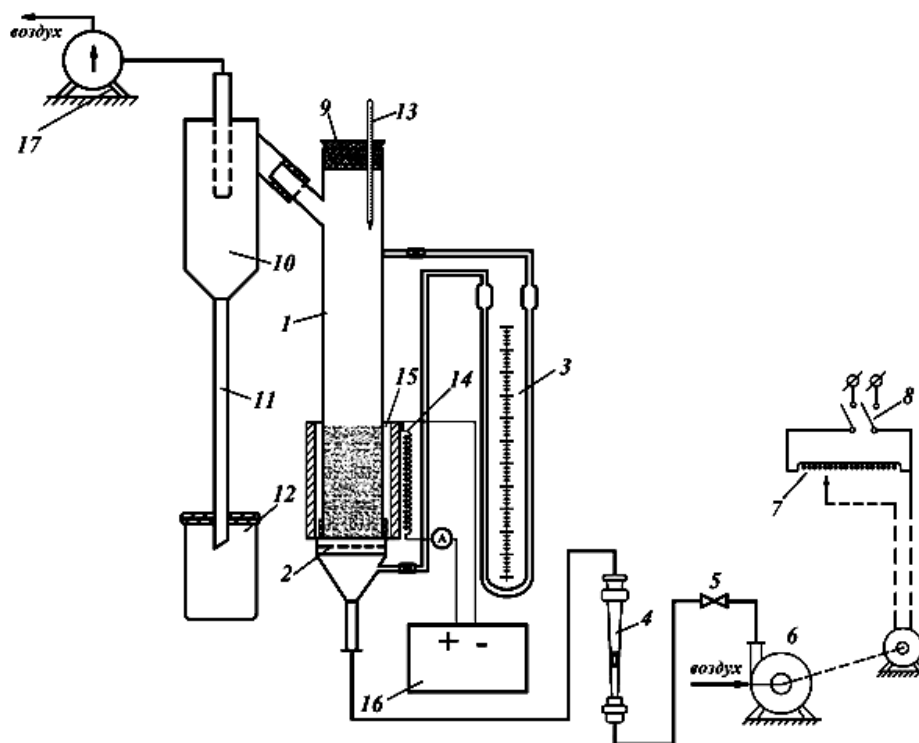


Рис. 1. Схема лабораторной установки для изучения гидродинамики «кипящего слоя катализатора» в магнитном поле: 1 – реактор, 2 – металлическая сетка, 3 – дифманометр, 4 – ротаметр, 5 – регулирующий вентиль, 6 – воздушный вентилятор, 7 – автотрансформатор, 8 – потенциометр, 9 – пробка, 10 – циклон, 11 – стойка, 12 – накопительная емкость, 13 – термометр, 14 – магнитная катушка, 15 – магнитопровод (сердечник), 16 – регулируемый источник питания, 17 – газовый счетчик

Установка перед пуском продувается азотом, предварительно пропускаемым через реактор с медными стружками, помещенный в печь, для удаления кислорода. Реактор 1 установки изготовлен из кварца и имеет объем реакционной зоны 30 см<sup>3</sup>, при внутреннем диаметре 30 мм<sup>2</sup>. Необходимую температуру процесса обеспечивали системой автоматического регулирования и автотрансформатором 7.

Гидродинамика псевдооживления [1, с. 47] восходящими потоками газа (воздуха) описывается зависимостями гидравлического сопротивления  $\Delta P$  (мм. вод. ст.) слоя твердых мелкозернистых частиц катализатора от скорости движения газа в свободном сечении аппарата  $W$  (м/с). Воздух на «кипение» подаётся через ротаметр 4, перепад давления в кипящем слое измеряется U-образным манометром 3. Для создания в реакционной зоне кипящего (псевдооживленного) слоя учитывается расход псевдооживляющего агента (воздуха), который замерялся при помощи водяного счётчика 17.

Используемый катализатор имел сферическую форму и размеры:  $d = l$ . Катализатор различного диаметра взвешивался в количестве 19,8 г при объеме, равном 20,0 см<sup>3</sup>, загружался в реактор, при этом плотность катализатора составила 0,65 г/см<sup>3</sup>. Для создания кипящего слоя через ротаметр 4 подавался воздух в количестве, необходимом для кипения, определенный расчётным путем. Потеря давления определялась по соответствующему объемному расходу воздуха. Экспериментальным путем определялся диапазон существования кипящего слоя, который описывается следующим соотношением:

$$W_{\text{крит.}} < W < W_{\text{уноса}}$$

Основными элементами гидродинамики «кипящего слоя» являются:

$W_{\text{к.с.}}$  – скорость, соответствующая началу кипения для частиц различного диаметра, которая определяется экспериментально, а также по формуле Лева:

$$W_{\text{к.с.}} = 9,35 \cdot 10^{-3} \frac{d^{1,82}}{\nu^{0,88}} \left( \frac{\rho_{\text{т.в.}} - \rho}{\rho} \right)^{0,94} \quad (1)$$

где:  $W_{\text{к.с.}}$  – фиктивная скорость жидкости, при которой начинается псевдо-оживление, м/с;  $d$  – средний диаметр частиц, форма которой принимается шарообразной, м;  $\nu$  – кинетическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{\text{т.в.}}$  и  $\rho$  – плотность твердых частиц и жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость уноса частиц из кипящего слоя, определяется по формуле:

$$Re_{yH} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \quad (2)$$

где:  $Ar$  – критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{gd^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{ТВ} - \rho}{\rho} \quad (3)$$

$$R_{\varepsilon,y} = \frac{W_y d}{\nu} \quad (4)$$

– значение критерия Рейнольдса, соответствующее скорости уноса.

$\varepsilon$  – порозность кипящего слоя, определяемая из соотношения:

$$\frac{Z}{Z_{нач.}} = \frac{I - \varepsilon_{нач.}}{I - \varepsilon} \quad (5)$$

где:  $Z_{нач.}$  – высота слоя до кипения

$$\varepsilon = 1 - \frac{G}{\gamma \cdot V_{к.сл}} \quad (6)$$

$\varepsilon$  – доля пустот (порозность слоя), представляющая собой отношение объема сложной фазы к объему кипящего слоя;  $\Delta P$  – потеря давления в кипящем слое, которая определялась по формуле:

$$P = (I - \varepsilon)\rho_{ТВ} \cdot g \cdot Z_{нач.} = (I - \varepsilon_{нач.})\rho \cdot g \cdot Z_{нач.} \quad (7)$$

Для определения порозности определяли критическую скорость  $W_{кр}$ . По критической скорости определяли критерий  $Re_{с.кр.}$ , и по которому рассчитывали порозность кипящего слоя. Так, установлено, что порозность кипящего слоя равна  $\varepsilon = 0,99$ .

Типичный график, отражающий характер псевдооживления, показан на рис. 2. В первоначальный момент времени, при малых расходах и скорости газа незначительно растёт сопротивление слоя и ослабляется взаимное давление сыпучих частиц мелкодисперсного катализатора, при этом постепенно увеличивается объём слоя катализатора (режим фильтрации). Затем при достижении критического значения скорости  $W_{кр}$  сопротивление слоя становится равным его весу, частицы перестают оказывать взаимное давление друг на друга, слой переходит во взвешенное, псевдооживленное состояние (ламинарный режим). При дальнейшем увеличении скорости потока расстояния между частицами увеличивается, порозность слоя возрастает, вызывая тем самым снижение скорости потока, а, следовательно, и силы, действующей на частицу, до значения, равного её весу. Тогда восстанавливается условие состояния взвешенного слоя, но уже при новом, большем значении её порозности. Практическим пределом существования взвешенного слоя является скорость потока, равная скорости уноса частицы  $W_u$ , при которой поток выносит частицы из слоя и последний прекращает своё существование. Характер псевдооживления показан на рис. 2.

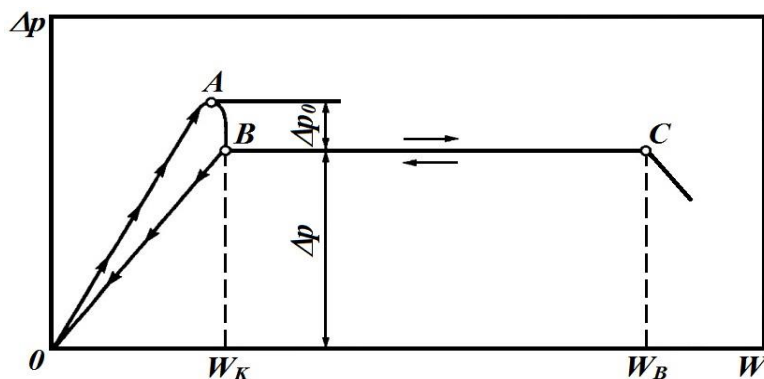


Рис. 2. Зависимость перепада давления в слое от скорости потока оживающего агента и гидравлическим сопротивлением слоя (перепадом давления)

Левая часть графика, представленная линиями ОА и ОВ, соответствует движению оживающего агента через неподвижный слой, когда с увеличением скорости потока сопротивление слоя растет. В точке В сопротивление слоя оказывается равным его весу и слой переходит во взвешенное состояние; соответствующее этой точке значение скорости называют критической скоростью  $W_{к}$  или скоростью начала псевдооживления. Перепад давления в точке А перед началом псевдооживления превышает вес слоя на

величину «пика давления»  $\Delta P_0$ , затрачиваемую потоком на преодоление сил сцепления между частицами. Величина  $\Delta P_0$  зависит от плотности упаковки частиц, формы и состояния их поверхности [2, с.13].

При дальнейшем увеличении скорости потока перепад давления в слое остается неизменным, и линия «кривой псевдооживления» идет параллельно оси абсцисс. Постоянство значения перепада давления в слое (участок ВС) характеризуется равенством гидродинамического давления и веса слоя, приходящегося на единицу площади его поперечного сечения, и сохраняется до значения WB, соответствующего скорости витания, выше которой частицы уносятся из слоя и наступает режим пневмотранспорта. В этом случае масса частиц в слое уменьшается и, следовательно, снижается гидравлическое сопротивление слоя [2, с.160].

Плотному слою на графике соответствуют линии OA и OB. Линия OA получена при постепенном увеличении скорости газа и соответствует перепаду давления в плотном слое, когда частицы слоя характеризуются первоначальной, более плотной упаковкой и меньшей порозностью. Линия OB соответствует перепаду давления в плотном слое, который образуется в результате постепенного снижения скорости потока при переходе от взвешенного слоя к плотному.

Перепад давления, соответствующий весу слоя, приходящегося на единицу площади его поперечного сечения, равен

$$\Delta p = H_0 g (\rho_T - \rho) (1 - \varepsilon_0), (8)$$

где  $\rho_T$  и  $\rho$  – соответственно плотность твердых частиц и потока.

Эксперименты по изучению гидродинамики проводились как на исходном катализаторе, так и на катализаторе, обработанном постоянным МП. В экспериментах фиксировалась потеря давления, расход воздуха, время проведения опыта и температура среды. Ниже в табл.1 представлены зависимости градиента  $\Delta P$  от скорости подачи оживающего агента (воздуха) W на катализаторе, без воздействия МП.

В табл.2 приведены значения потери давления  $\Delta P$  от скорости подачи газа W (м/с) и расчетные зависимости между гидравлическим сопротивлением  $\Delta P$  и скоростью подачи воздуха W в отсутствие магнитного поля, а также значения числа Рейнольдса Re, которое характеризует соотношение сил инерции и вязкости в потоке и соответственно вид течения – ламинарного или турбулентного. Определено, что при  $Re_{кр} > 10$  имеет место переход от режима фильтрации к режиму кипящего слоя.

Таблица 1. Зависимость перепада давления от скорости потока оживающего агента и гидравлического сопротивления слоя в отсутствие МП

Состояние слоя	Показатель дифрамометра		Ротамер №1	Высота катализаторного слоя, мм	Ротамер №2	Время в мин.	V, л	Температура воздуха, °C
	правая	левая						
Режим фильтрации	-8	+1	0	19,8	0	65,44	3	18
Начало появления пузырьков в слое	-11	+1	0	19,8	0	30,20	3	18,5
Начало кипящего слоя	-11	+1		20,0	0	25,33	3	18,5
Кипящий слой	-11	+1	15	21,0	0	22,24	5	19
Кипящий слой	-11	+1	20	22,0	0	20,10	5	19,5
Кипящий слой	-12	+2	78	23,5	0	10,56	5	19,5
Кипящий слой	-13	+3	90	23,5	10	9,01	5	19,5
Кипящий слой	-13	+3	100	24,0	20	8,12	5	20
Нормальный слой (пузырьки в слое)	-14	+1	0	20,0	0	18,06	3	20
Кипящий слой	-14	+1	10	22,0	0	15,07	3	20
Кипящий слой	-14	+2	20	25,0	10	10,40	3,5	20

Таблица 2. Гидродинамика «псевдооживленного слоя» катализатора без МП

Расчеты экспериментальной части				
Критерий Re	$\Delta P$ (мм.рт.ст)	Lg $\Delta P$	W(м/с)	Lg W
2,4	9	0,845	$1,3 \cdot 10^{-3}$	-2,89
5,1	12	1,079	$2,79 \cdot 10^{-3}$	-2,55
6,086	12	1,079	$3,32 \cdot 10^{-3}$	-2,478
11,055	12	1,079	$6,03 \cdot 10^{-3}$	-2,22
12,8	12	1,079	$7 \cdot 10^{-3}$	-2,15

23,8	14	1,146	$13 \cdot 10^{-3}$	-1,89
51,3	16	1,204	$28 \cdot 10^{-3}$	-1,55
31,7	16	1,204	$17,3 \cdot 10^{-3}$	-1,76

Изучалось воздействие МП на гидродинамику «кипящего слоя» мелко-дисперсного катализатора. При этом реактор с катализатором был помещен в МП индуктивностью 0,25-0,40 Тл [3, с. 52].

На рис. 3 и 4 представлены кривые псевдооживления катализатора в отсутствии магнитного поля (МП) и под воздействием МП напряженностью 0,25-0,40 Тл.

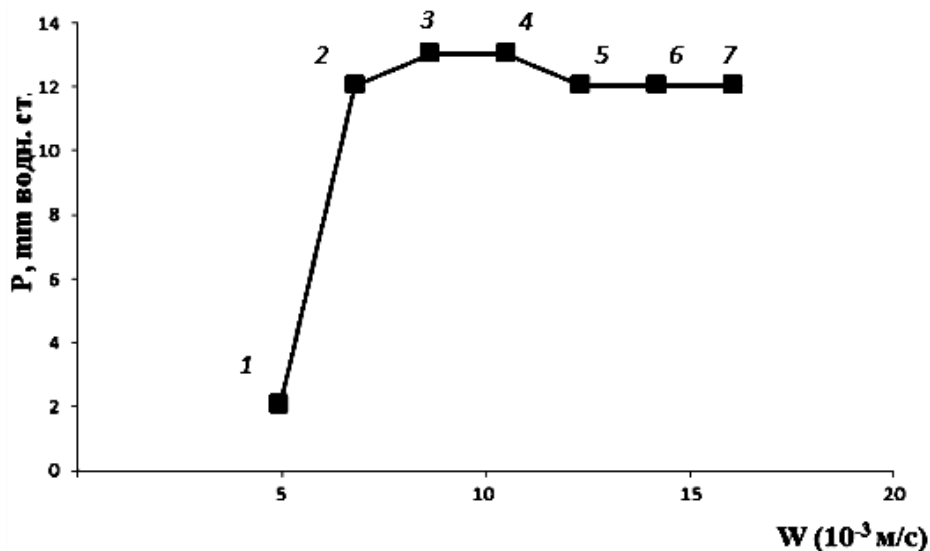


Рис. 3. Зависимость скорости потока воздуха от потери давления для катализатора (Омникат-210П) без воздействия МП

Как видно из рис.3. зависимость между потерей давления  $\Delta P$  от скорости подачи воздуха  $W$  при малых скоростях до определенного уровня, от точки 1 до точки 2, меняется по прямолинейному закону. В точке 2 скорость подачи воздуха равняется критической скорости фильтрации  $W_k$ , затем увеличение скорости полностью зависит от контакта между частицами слоя. В зоне между точками 2 и 3 наблюдается увеличение объема слоя на 5-10%, то есть, уменьшается плотность и нарушается гомогенность. Начало «псевдооживления» слоя начинается при скорости подачи воздуха, равной 10 м/с. Между точками 3 и 4 наблюдается режим «кипящего» слоя. При этом увеличение расхода воздуха приводит не к увеличению потери  $\Delta P$ , а наоборот – к его уменьшению, после точки 4  $\Delta P$  перестает быть зависимым от скорости подачи воздуха – наступает режим витания частиц после точки 7. Из рис. 3 и данных табл. 1 и 2 видно, что стабилизированный ламинарный режим переходит к псевдооживленному с увеличением средней по сечению скорости и сопровождается изменением визуальной картины течения.

В случае применения магнитообработанного катализатора наблюдалась несколько иная картина. Переход от режима фильтрации (точки 1-2) в режим псевдооживления (точки 5-7) наблюдается при более низком критическом значении скорости подачи агента  $W_{кр}$ .

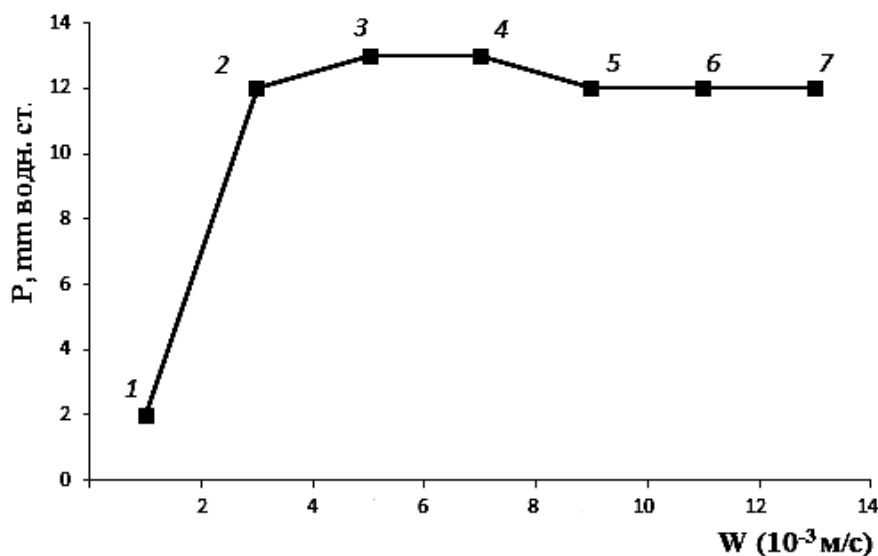


Рис. 4. Кривая псевдооживления магнитообработанного катализатора

Из рис. 4 видно, что магнитное поле в 2 раза ускоряет достижение переходного периода от режима фильтрации в режим псевдооживления. Если режим псевдооживления для исходного катализатора наступал при скорости подачи воздуха  $W = 10$  м/с, то для магнитообработанного катализатора это состояние наблюдалось при скорости  $W = 5$  м/с [4, с. 66].

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что воздействие магнитного поля на катализатор крекинга приводит к ускорению перехода от фильтрационного режима к псевдооживленному, причем в данном случае реализуется однородный псевдооживленный слой, который является стабильным на всем протяжении своего существования, что в свою очередь, способствует увеличению выхода целевых продуктов реакции, повышению селективности процесса.

#### Список литературы / References

- 1 Унгер Ф.Г., Красногорская Н.Н., Андреева Л.И. Роль парамагнитных молекул в межмолекулярных взаимодействиях нефтяных дисперсных систем, Препринт. Томск, 1987. № 11. 46 с.
- 2 Ергин Ю.В., Ярулин К.С. «Магнитные свойства нефтей». Наука. М., 1973 г. С. 13-87, 160-168
- 3 Летцие У. «Совершенствование каталитического крекинга для выработки чистых топлив» «Нефтегазовые технологии», 2005. № 6. С. 52.
- 4 Хенц Г., Азеведо Ф., Чеберлейн О., Коннор Р.О. Нефтегазовые технологии, 2005. № 2. С. 66-72.